

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

BİLECİK İLİ LEFKE TAŞI, BENTONİT KİLİ VE CENNET AĞACI (*Ailanthus altissima*) BİYOÇARININ ATIK SULARDA FOSFOR GİDERİMİNDE KULLANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETÜL ÇANGA

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. RAMAZAN MERAL

BİLECİK, 2025

10596698

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

BİLECİK İLİ LEFKE TAŞI, BENTONİT KİLİ VE CENNET AĞACI (*Ailanthus altissima*) BİYOÇARININ ATIK SULARDA FOSFOR GİDERİMİNDE KULLANIMI

YÜKSEKLİSANS TEZİ

BETÜL ÇANGA

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. RAMAZAN MERAL

BİLECİK, 2025

10596698

BEYAN

Bilecik İli Lefke Taşı, Bentonit Kili ve Cennet Ağacı (*Ailanthus altissima*) Biyoçarının Atık Sularda Fosfor Gideriminde Kullanımı adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	X	DESTEK ALINMAMIŞTIR	
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi) *		GAP-2024-545	
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Öğrenci Adı ve Soyadı

Betül ÇANGA

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Tez çalışmam boyunca danışmanlığımı yürüten ve tez konumun belirlenmesinden çalışmanın sonuçlandırılmasına kadar değerli görüş ve önerilerini sunan, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yardımlarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Ramazan MERAL'a, şuan altı yaşında olan canım kızıma ve eşime, anneme, babama, kardeşlerime tüm süreçte yanımda ve destekçim oldukları için çok teşekkür ederim.

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından GAP-2024-545 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Betül ÇANGA

2025

ÖZET

BİLECİK İLİ LEFKE TAŞI, BENTONİT KİLİ VE CENNET AĞACI (*Ailanthus altissima*) BİYOÇARININ ATIK SULARDA FOSFOR GİDERİMİNDE KULLANIMI

Çevre ve insan sağlığı açısından, atık suların arıtılarak zararsız hale getirilmesi, yeniden kullanımı önem arz etmektedir. Yüksek fosfor konsantrasyonu özellikle siyanobakterilerin artmasını hızlandırmaktadır. Atık sular, yüksek besin maddesi (nütrient) içeriği sebebiyle alıcı ortamda oksijen tüketiminin artması, ötrifikasyon ve toksisite gibi sorunlara sebep olmaktadır. Su kalitesinin korunması ve alıcı ortamlarda ötrifikasyon riskinin azaltılması için ideal nütrient oranlarının sağlanması amacıyla karbon ve azot gibi nütrientlerin yanısıra fosforun da arıtılması gerekli olabilmektedir. Atık sudaki fosforu; kimyasal, fiziksel ve ileri biyolojik yöntemlerle giderip yoluyla geri kazanmayı amaçlayan teknolojiler sürekli gelişim halindedir. Adsorbsiyon yönteminde ise; adsorbanın fiziksel ve kimyasal özellikleri, fosforu adsorbe etme yeteneği, maliyet ve elde etme kolaylığı ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada kolay ulaşılabilirliği olan yöresel lefke taşı, cennet ağacı biyoçar materyali ve bentonit kilinin farklı modifikasyonları; atık sularında fosfor gideriminde adsorban olarak kullanılmıştır. Çalışma yapay olarak oluşturulan 20, 40 ve 60 ppm fosfor içerikli, pH değeri 4, 7 ve 10 olan atık su ortamlarında yürütülmüştür. Herbir adsorbandan sırasıyla %0,5, %2 ve %5 oranında dozlar kullanılmıştır. Karışım 60 dakika boyunca 150 rpm hızında orbital çalkalayıcıda bekletildikten sonra süzülerek sıvıda kalan fosfor içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar giderim yüzdesi ve adsorbsiyon kapasitesi değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre Bilecik ilinde önemli miktarda rezervi olan Lefke taşının termal modifiye uygulanmış halinin atık sularında fosfor giderimi için çok etkin (%95,273 - 97,451) bir adsorban olarak kullanılabilmesi anlaşılmıştır. Artan fosfor içeriğine bağlı olarak da kullanılacak adsorban dozunun ayarlanması önemli bulunmuştur. İkinci öneri olarak ise Bentonit kilinin termal modifikasyonlarının uygun dozlarda kullanılması durumunda %54,964 düzeyinde fosfor giderimi sağlayabileceği sonucu elde edilmiştir. Son olarak yörede istilacı şekilde yetişen Cennet ağacında elde edilen Biyoçar adsorbanı düşük pH ortamında ve uygun dozda %42,953 düzeyinde fosfor giderimi sağladığı görülmüştür. Bu kaynakların kullanılması ekonomik, kolay ulaşılabilir olması ve doğal materyaller olması yönüyle de büyük avantajlar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kil, Lefke Taşı, Biyoçar, Ötrifikasyon, Fosfor Giderimi

ABSTRACT

USE OF BILECIK PROVINCE LEFKE STONE, BENTONITE CLAY AND TREE OF HEAVEN (*Ailanthus altissima*) BIOCHAR IN PHOSPHORUS REMOVAL FROM WASTEWATER

For environmental and human health, treating wastewater to render it harmless and reusing it is crucial. High phosphorus concentrations, in particular, accelerate the growth of cyanobacteria. Due to their high nutrient content, wastewater causes problems such as increased oxygen consumption, eutrophication, and toxicity in the receiving environment. To maintain water quality and reduce the risk of eutrophication in the receiving environment, phosphorus treatment may be necessary in addition to nutrients such as carbon and nitrogen to ensure ideal nutrient ratios. Technologies aimed at removing and recovering phosphorus from wastewater through chemical, physical, and advanced biological methods are constantly evolving. In the adsorption method, the physical and chemical properties of the adsorbent, its ability to adsorb phosphorus, its cost, and its ease of acquisition are paramount. In this study, various modifications of readily available local lefke stone, tree of heaven biochar material, and bentonite clay were used as adsorbents for phosphorus removal from wastewater. The study was conducted in artificially created wastewater environments with phosphorus contents of 20, 40, and 60 ppm, and pH values of 4, 7, and 10. Doses of each adsorbent were used at 0,5%, 2%, and 5%, respectively. The mixture was kept in an orbital shaker at 150 rpm for 60 minutes, then filtered to determine the phosphorus content of the liquid. The results were compared considering removal percentage and adsorption capacity values. According to the study results, it was understood that the thermally modified form of Lefke stone, which has a significant reserve in Bilecik province, can be used as a very effective adsorbent (95,273 – 97,451%) for phosphorus removal in wastewater. Adjusting the adsorbent dose depending on the increased phosphorus content was also found to be important. As a second recommendation, it was concluded that the use of thermal modifications of bentonite clay at appropriate doses could provide phosphorus removal at a level of 54,964%. Finally, the Biochar adsorbent, derived from the invasive tree of Heaven in the region, was found to provide 42,953% phosphorus removal in a low pH environment and at the appropriate dosage. Using these resources will also offer significant advantages due to their affordability, ease of access, and natural nature.

Keywords: Clay, Lefke Stone, Biochar, Eutrophication, Phosphorus Removal

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
GRAFİKLER LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1. Sularda Fosfor Kirliliği Kaynakları	5
2.2. Fosfor Kirliliğinin Etkileri	8
2.3. Sulardan Fosfor Giderim Yöntemleri	11
3. MATERYAL METOD	18
3.1. Materyal	18
3.1.1. Kullanılan Adsorban Maddeler	18
3.1.1.1. Lefke Taşı	18
3.1.1.2. Bentonit	19
3.1.1.3. Cennet Ağacı (Ailanthus altissima)	20
3.1.2. Kullanılan Cihaz ve Kimyasal Maddeler	21
3.2. Metod	22
3.2.1. Adsorbanların Hazırlanması	22
3.2.2. Fosfor Çözeltilsinin hazırlanması	24
3.2.3. Vanadomolibdofosforik Asit Metodu ile Fosfor Belirlenmesi	24
4. BULGULAR	26

4.1. Adsorbanların Karakterizasyonu	26
4.2. Fosfor giderim testi sonuçları	29
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	36
KAYNAKÇA.....	39

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- AB** : Avrupa Birliği
- AKM** : Askıda Katı Madde
- Al** : Alüminyum
- ATP** : Adenozin Trifosfat
- B** : Bentonit
- BC** : Biyokömür
- BET** : Brunauer-Emmett-Teller
- BK** : Birleşik Krallık
- BÇ** : Biyoçar
- Ca** : Kalsiyum
- Dk** : Dakika
- DNA** : Deoksiriboz Nükleik Asit
- Fe** : Demir
- FeSO₄** : Demir Sülfat
- FGDG** : Baca Gazı Kükürt Giderme Alçısı
- g** : Gram
- g/cm³** : Gram / Santimetreküp
- GIS** : Mekansal Sıcak Nokta Analizi
- H** : Hidrojen
- HCL** : Hidroklorik Asit
- IP** : İnorganik Fosfor
- K** : Kimyasal
- kg/ha** : Kilogram / Hektar
- LT** : Lefke Taşı
- M** : Molarite

MB : Modifiye Bentonit

Mg : Magnezyum

MgO : Magnezyum Oksit

mg/L : Miligram / Litre

MLT : Modifiye Lefke Taşı

mm : Milimetre

Na : Sodyum

NaOH : Sodyum Hidroksit

NADPH : Nikotinamid Adenin Dinükleotit Fosfat Hidrojeni

NH₃-N : Amonyak Azotu

N : Azot

NTU : Nefolometrik Bulanıklık Birimi

O : Oksijen

oPO₄-P : Orto Fosfat Fosforu

OP : Organik Fosfor

P : Fosfor

PAO : Fosfor Biriktiren Organizmalar

PO₄-P : Fosfat Fosforu

PO₄³⁻ : Fosfat İyonu

Ppm : Milyonda Bir Birim

Rpm : Dakika Başına Devir

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

Si : Silisyum

SWW : Mezbaha Atık Suyu

°C : Santigrat Derece

% : Yüzde

TS 266 : İnsani Tüketim Amaçlı Sular

TN : Toplam Azot

TP : Toplam Fosfor

WHO : Dünya Sağlık Örgütü

YSKY : Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği

Zr@ATP : Attapulgitin Zirkonyum

µg/L : Mikrogram / Litre

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. 1/2/2023 Tarih ve 32091 Sayılı Resmi Gazetede Yayınlanan Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği.....	9
Tablo 2.2. 12/5/2023 Tarih ve 32188 Sayılı Resmi Gazetede Yayınlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği.....	10
Tablo 4.1. BET (Brunauer-Emmett-Teller) Analiz Sonuçları.....	28
Tablo 4.2. Farklı Ph Koşullarında Başlangıç Fosfor İçeriği 20 ppm Olan Çözeltide Elde Edilen Son Fosfor Değerleri, (ppm).....	29
Tablo 4.3. Farklı Ph Koşullarında Başlangıç Fosfor İçeriği 40 ppm Olan Çözeltide Elde Edilen Son Fosfor Değerleri, (ppm).....	30
Tablo 4.4. Farklı Ph Koşullarında Başlangıç Fosfor İçeriği 60 ppm Olan Çözeltide Elde Edilen Son Fosfor Değerleri, (ppm).....	31
Tablo 4.5. Başlangıç Fosfor İçeriği 20 ppm Olan Çözeltide Elde Edilen % Giderim Ve Adsorbsiyon Kapasite Değerleri (qe).....	32
Tablo 4.6. Başlangıç Fosfor İçeriği 40 ppm Olan Çözeltide Elde Edilen % Giderim Ve Adsorbsiyon Kapasite Değerleri (qe).....	33
Tablo 4.7. Başlangıç Fosfor İçeriği 60 ppm Olan Çözeltide Elde Edilen % Giderim Ve Adsorbsiyon Kapasite Değerleri (qe).....	34
Tablo 5.1. Fosfor Giderimi Adsorpsiyon Çalışmaları ve pH Etkisi	36
Tablo 5.2. Fosfor Giderimi Adsorpsiyon Çalışmaları ve Termal modifikasyon.....	38

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Sularda Fosfor Kirliliği Etkilerinin Şematik Görünüşü.....	8
Şekil 3.1. Lefke Taşı Doğal Görüntüsü.....	18
Şekil 3.2. Lefke Taşı Yakın Görüntüsü.....	18
Şekil 3.3. Termal Modifiye Lefke Taşı.....	19
Şekil 3.4. Bentonit (Firmadan Gelen)	19
Şekil 3.5. Bentonit (Analize Hazır Görüntüsü).....	20
Şekil 3.6. Termal Modifiye Bentonit	20
Şekil 3.7. Cennet Ağacı.....	21
Şekil 3.8. Cennet Ağacı Talaşı.....	21
Şekil 3.9. Spektrofotometre	22
Şekil 3.10. Piroliz Cihazı	23
Şekil 3.11. Cennet Ağacı Biyoçarı.....	23
Şekil 4.1. Taramalı elektron mikroskonu ile elde edilen adsorban yüzey görüntüleri (B: Bentonit, MB: modifiye bentonit, LT: Lefke Taşı, MLT: modifiye lefke taşı ve BÇ: Biyoçar)	26

GRAFİKLER LİSTESİ

Grafik 4.1. Ortalama Adsorbsiyon Kapasite Değerleri	35
--	----

1. GİRİŞ

Canlılar için önemli yapı elementi olan fosforun; doğadaki en büyük rezervi, yer kabuğundaki fosfatlı kayalar, ticari gübreler ve su kaynaklarıdır. Uçucu olmayan fosfor, atmosfere geçmediğinden; Fosfor döngüsü, diğer döngülerden (Oksijen, Azot ve Sülfür gibi) farklıdır. Bitkiler; fosforun çözünüp iyonlaşmış formu olan orto-fosfatları kullanıp, tüketirler. Otçul hayvanlar için fosforun tek kaynağı, bitkilerdir. Etçil hayvanlar ise otçul hayvanları yiyerek fosfor ihtiyaçlarını giderirler (Ayar, 2009).

Kalsiyumdan sonra insan vücudunda en fazla bulunan mineral fosfordur. Tüm canlıların ihtiyaç duyduğu fosfor; ATP, DNA, NADPH, fosfolipitler, nükleik asitlerin başlıca bileşenidir. Vücuttaki hücrel faaliyetler, enerji üretimi, kalbin kasılması, kas-sinir hareketleri, diş-kemik dokusu ve böbrek açısından da fosfora ihtiyaç duyulur (Çetin, 2013).

Su bitkileri ve algler için de fosfor gerekli bir besin elementidir. Fakat; fosforun suya fazla taşınımı ötrifikasyon denilen kirliliğe neden olmaktadır. Suda artan fosfor, fitoplankton büyümesini hızlandırmaktadır. Daha sonra; balıklar, mikroorganizmalar, böcekler ve diğer su canlıları bu olumsuzluklardan sırasıyla etkilenmektedir. Yani; fosfor, sudaki doğal dengeyi bozarak, zehirli alglerin sudaki gelişimini artırmaktadır (Ayar 2009, Çetin 2013). Göller ve nehirlerdeki su kirliliğinin temel nedeni nütrient fazlalığıdır. Sudaki fosfor ve diğer besinler, suyun şeffaflığının giderek azalmasına neden olur ve bu da ekolojik dengeyi bozar. Ötrifikasyonla birlikte bu durum alg patlamasına ve balıkların ölümüne yol açarak su ekosistemini bozmaktadır (Li vd., 2021).

Yüksek konsantrasyonlarda fosfor içeren atıksuların kontrolsüz şekilde alıcı ortama deşarj edilmesi sonucunda su kalitesinde önemli ölçüde bozulmalar oluşabilmektedir. Su kalitesinin korunması ve alıcı ortamlarda ötrofikasyon riskinin azaltılması için gerekli nütrient oranlarının sağlanması amacıyla karbon ve azot gibi nütrientlerin yanı sıra fosforun da arıtılması gerekli olabilmektedir. Genel olarak fosforun birincil kaynağı; sabun, deterjan, şampuan gibi temizlik malzemeleridir. Bir kısmı toprakta tutulsa da, geçirgenliği yüksek topraklarda fosforun tutulma yüzdesi azdır. Fosforlu tarımsal gübrelerin de kullanılmasıyla ötrifikasyon riski giderek artmaktadır (Tunçal vd., 2008; Atıcı, 2023).

Yüksek fosfor konsantrasyonu özellikle siyanobakterilerin artmasını hızlandırmaktadır. Atık sular, yüksek besi maddesi içeriği sebebiyle alıcı ortamda oksijen tüketiminin artması, ötrifikasyon ve toksisite gibi sorunlara sebep olmaktadır. Ötrifikasyon;

fitoplankton ve mikroorganizmaların artışına, toksin salgılayan siyanobakterileri de barındıran alg patlamalarına ve alglerin çökerek dip sulardaki çözünmüş oksijeni bitirmesine sebep olmaktadır. Böylelikle ötrifikasyon; suların tadını ve rengini bozup, faydalı gıda ürünleri olan balık ve kabuklu canlı türlerinde de azalmaya neden olmaktadır. Organik maddelerin oksijensiz ortamda parçalanmasıyla ise metan, amonyak ve hidrojen sülfür gibi kötü kokan gazlar türemektedir. Bu gazlar da deniz canlıları üzerinde toksik etki oluşturmaktadır. Ötrifikasyon sebebiyle deniz yosunları artarak, güneş ışığının geçişini engellemektedir. Fotosentezin durmasıyla da sıvıdaki oksijen azalmakta ve sonuçta omurgasız sucul canlılar ve balıklar yok olabilmektedir (Atıcı, 2023; Çetin, 2013; Dirim, 2006; Erdoğan, 2022; Zeybek, 2019).

Fosfor, su kütlesindeki fitoplankton büyümesini etkileyerek zararlı alglerin çoğalmasına ve suda çözünmüş oksijeni tüketmesine neden olabilir; böylece su ekosistemini ve su kalitesini etkiler (Wang vd., 2025).

Çevre ve insan sağlığı açısından, atık suların arıtılarak zararsız hale getirilmesi hatta, yeniden kullanımı önem arz etmektedir. Fakat; atık suların arıtılıp yeniden kullanımı için geliştirilen teknolojilerin, kurulumunun, bakım ve onarımının pahalılığı sebebiyle uygulanabilirliği sınırlıdır. Bu nedenle, kıyasla ucuz ve kolay olan alternatif arıtma yöntemlerine eğilim artmaktadır.

Atık sulara fosfor girişi azaltılmaya çalışılsa da, fosfor kaynaklarının çeşitliliği sebebiyle başarı sağlanamamaktadır. Bu nedenle, atık suların ileri düzeyde arıtımı gündemde yerini korumaktadır. Atık sularda fosforu; kimyasal, fiziksel ve ileri biyolojik yöntemlerle giderip, geri kazanmayı amaçlayan teknolojiler sürekli gelişim halindedir. Fiziksel yöntemlerden; fosforu kristalleştirme, flotasyon, elektrodializ ve ters osmoz sıkça kullanılmaktadır. İleri biyolojik fosfor giderimi ise, pahalı olmasına rağmen, toplam fosforun %97'sini giderebilmektedir. Kimyasal giderim ise, fosforun fosfat halinde kalsiyum, alüminyum ve demir iyonlarının tuzları ile çöktürülmesini hedeflemektedir (Ayar, 2009).

Fosfor çöktürmede yaygın kullanılan kimyasal maddelerden bazıları; Ca bileşikleriyle Mg, Al ve Fe tuzlarıdır (Zeybek, 2019). Aktif çamur sistemlerinde bulunan bakteri cinslerinden olan *Acinetobacter*, sudan fosforu uzaklaştırmada kullanılabilecek bir diğer alternatiftir (Erdoğan, 2022). Fakat temelde; atık sulardan fosfor gideriminde; ters osmoz, elektrodializ, adsorbant kullanımı, cüruf, arıtma çamuru, uçucu kül, kaolinit ve tarımsal atıktan elde edilen aktif karbonlar kullanılmaktadır. Aktif karbon üretiminde kullanılan

tarımsal ham maddelerden bazıları; mısır koçanı, zeytin çekirdeği, pamuk sapı, meyve atıkları, şeker kamışı, buğday samanı, çeltik kabuğu, ayçiçek çekirdeği-fındık-badem kabuğudur (Atıcı, 2023; Zeybek, 2019). Diğer yöntemlere kıyasla adsorpsiyon, fosfor gideriminde daha başarılı ve ekonomiktir. Bu sebeple; son yıllarda, kolay ulaşılabilen ve ucuz materyallerle atık suların arındırılması denenmektedir (Çetin, 2013). Adsorbsiyon prosesinin ucuzluğu ve basitliği sebebiyle sıkça kullanılmaktadır. Atık sulardaki fosforu gidermede; özellikle biyokömür, hindistan cevizi kabuğu, kalsiyum karbonat, kalsiyum kaolinit, kırmızı çamur, yarı yanmış dolomit, uçucu kül, cüruf, zeolit, titanyum dioksit, kum ve süngertaşı oldukça başarılı olmuştur (Zeybek, 2019).

Özellikle bazı kil çeşitleri, fosfor gideriminde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu örneklerden biri olan, Amerika'da bentonit adı verilen bu kil çeşidine, Fransa'nın Montmorillon bölgesinde de sıkça rastlanıldığından, burada bu kile montmorillonit de denmektedir. Bentonitin genel kimyasal formülü; $(Na,Ca)(Al,Mg)_6(Si_4O_{10})_3(OH)_6 \cdot nH_2O$ şeklindedir (Ayar, 2009). Bentonitler, atık su arıtımında kullanılan en bol kil içeren malzemelerdir. Gerek ağır metal giderimi (bakır, kurşun, kadmiyum ve çinko) gerek fosfor gideriminde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Fosfor adsorbsiyonunu etkileyen en önemli faktörlerden birisi, pH'dır. Ayrıca, azalan sıcaklık da adsorbsiyon kapasitesini artırmaktadır (Ayar, 2009). Fosfor gideriminde kullanılacak en uygun adsorbanın seçiminde; adsorbanın fiziksel ve kimyasal özelliklerine, fosforu adsorbe etme yeteneğine, maliyet ve elde etme kolaylığına dikkat edilmektedir (Çetin, 2013).

Kil minerallerinin yapısındaki hidratlı parçacıkların yüzey dağılımı, temel reaksiyon bölgeleri ve yüzey reaksiyonları (örneğin adsorpsiyon) termal modifikasyon yoluyla değiştirilerek daha etkin hale getirilebilir. Termal modifikasyon; kil yapısının ayrışmasına, hidrojen bağının kopmasına ve çok katmanlı yapının tahrip olmasına yol açan dehidroksilasyon olarak tanımlanabilir. Isıl işlem olarak da adlandırılan bu uygulama, ham kil minerallerinin belirli bir süre (genellikle 2-4 saat) belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasını içerir. Modifikasyonların meydana geldiği sıcaklıklar, modifiye edilen kilin tipine, içerdiği mineral gruplarına, parçacık boyutuna ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak değişir (Kalpaklı vd., 2022).

Suda fosforu bentonit kiliyle giderme amaçlı birçok çalışma yapılmıştır. En iyi giderimin, nötr pH'da olduğunu belirlenmiştir. Sonuçta; fosfor gideriminde, fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin beraber etkin olduğu görülmüştür (Ayar, 2009). Li vd., (2021) Kaolin

kili ve demir klorür karışımıyla fosfor gidermeyi farklı mollerle denemiştir. Nötr pH'da, fosfatların demir tarafından büyük oranda uzaklaştırıldığını tespit edilmiştir

Biyokömür (BC), tarım ve ormancılık atıkları gibi biyo kütleinin oksijensiz koşullar altında termal ayrışmasıyla oluşan, karbon açısından zengin, stabil bir üründür. İnce gözenek yapısı ile güçlü adsorpsiyon kapasitesine, düşük çözünürlüğe, kararlı fiziksel ve kimyasal özelliklere, zengin gözenek yapısına ve geniş spesifik yüzey alanına sahiptir. BC herhangi bir organik malzemeden yapılabilir; yaygın hammaddeler pirinç kabuğu, saman, hayvan gübresi, kanalizasyon çamuru ve diğer bazı tarımsal atıklardır. Biyokömür azot ve fosforu etkili bir şekilde adsorbe eden ve uzaklaştıran bir adsorban olarak yaygın ilgi görmektedir (Dai vd., 2020).

Bu çalışmada hem doğal hem de ekonomik bir yöntem olarak yerel bazda ulaşılabilir adsorband malzemelerinin kullanılması amaçlanmıştır. Bilecik ili sınırları içerisinde yüksek rezerv ve üretim potansiyeli olan Lefke taşı, Bentonit kili materyalleri ve Cennet ağacından elde edilmiş biyoçar materyalinin sularda fosfor giderimi amaçlı kullanım olanakları incelenmiştir. Böylece hem bu arıtma süreci doğal, çevreye zararsız ve ekonomik olarak gerçekleştirilirken; aynı zamanda bu ürünler katma değeri yükseltilerek kullanım alanları geliştirilmiş olacaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Sularda Fosfor Kirliliği Kaynakları

Bir akarsu havzasında fosfor kirliliğine neden olan kaynaklar genel olarak; noktasal ve yayılı kaynaklar olarak sınıflandırılabilir. Noktasal kaynaklı kirleticiler; endüstriyel atık sular, atık su arıtma tesislerinden bırakılan sular, atık depolama sahası sızıntıları şeklinde sıralanabilir. Bu tür kirleticiler konumları, deşarj hacimleri ve bileşimleri açısından tanımlanmış olup bir dereceye kadar etkili bir şekilde kontrol edilmesi mümkündür (Bouwman vd., 2013; Chen vd., 2008; Kroiss vd., 2011; Zhang vd., 2021).

Sularda yayılı kaynaklardan oluşan fosfor kirliliği, belirgin olmayan yerlerden kaynaklanan kirleticilerin akış yoluyla alıcı su kütlelerine taşınması sürecini ifade etmektedir. Noktasal olmayan kirlilik; alansal ve zamansal değişkenliği, dağınık ve görünmez özellikleri nedeniyle izlenmesi ve yönetimi zorluk içermektedir (Huang vd., 2022; Ma vd., 2022; Panagos vd., 2022). Bu tür kirlilik esas olarak tarımsal noktasal olmayan kaynaklar, kentsel noktasal olmayan kaynaklar ve atmosferik birikim olmak üzere üç grupta toplanabilir (Chiwa, 2020; Huang vd., 2022; Ongley vd., 2010).

Tarımsal noktasal olmayan fosfor kaynakları, öncelikle tarımsal alanlarda gübreleme sonrası besin kaybindan oluşmakta; sulama, yüzey akışı ve toprak erozyonu gibi süreçleri kapsamaktadır (Meral vd., 2004; Zou vd., 2020). Bununla birlikte özellikle geçirgenliği yüksek kumlu topraklarda, bitki sistemine bağlı olarak (Hussain vd., 2021), çatlak ve tercihli akışın (Merdun, 2012) söz konusu olduğu durumlarda, drenaj çıkış debisine (Kinley vd., 2007) yani derine sızma kayıplarına bağlı olarak fosfor taşınımı gerçekleşmektedir. Ayrıca erozyonla taşınan toprak içerisinde fosfor da önem taşımaktadır. Özellikle yüzey sulama yöntemlerinin yaygınlıkla kullanıldığı tarım topraklarında erozyonun büyük boyutlarda yüzey sularının kirliliğine neden olduğu bilinmektedir. Aşırı gübre uygulamaları toprakta fosfor birikmesine neden olmaktadır. Bu durumda oluşacak yüzey akışlar daha fazla fosfor taşınımına kaynak oluşturacaktır. Tarımsal üretimde gübreleme, sulama, yüzey akış ilişkisinin dikkate alınması fosfor taşınımını en aza indirecektir (Meral vd., 2004; Meral, 2017).

Jagemma vd. (2023) yaptıkları çalışmada Finfinne'i-Oromia (Etiyopya) bölgesinde akarsulara yayılan endüstriyel atıkların veya atıkların fizikokimyasal miktarını analiz etmişlerdir. Toplam fosfor (TP) değerleri çalışma sahalarında 4,50 ila 19,67 mg/L arasında,

değiştirdiği; buna likör ve tekstil fabrikalarından gelen atıkların su kütlesine deşarj edilmesinin neden olduğunu belirtmişlerdir,

Liu & Gao (2022) yaptıkları çalışmada, toplam nehir kirletici yükünü InVEST modeli kullanılarak tasarlanmıştır. Nehir kirliliği yükü değerlendirme yönteminin optimizasyonu doğrusal analiz ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Çin'in Haikou, Dongfang ve Lingao bölgelerindeki toplam fosforun kütle konsantrasyonu 0,05 ile 0,075 mg/L arasında olduğu ve ötrifikasyon riski ciddi ve kontrol altına alınması gerektiği belirtilmiştir.

Ding vd., (2023) Nanyi Gölü (Çin) Havzası'nda InVEST modelini ve GIS kullanarak yaptıkları çalışmada, tarımsal toplam fosforun noktasal olmayan kaynaklı kirliliğin temel kaynak alanlarını araştırmışlar sonuç olarak pirinç tarlalarının birincil kirlilik kaynağı oluşturduğunu tespit etmişlerdir.

Hou vd., (2022) Huangqian (Çin) havzası boyunca noktasal olmayan kaynaklı toplam fosforun (TP) kirlilik kaynaklarını ve özelliklerini araştırmak için yağış ve araziye dayalı değiştirilmiş model kurmuşlardır. Sonuçlar, toplam fosfor (TP) yükünün yüksekten düşüğe kırsal yaşam (%61,19), hayvancılık ve kümes hayvanı yetiştiriciliği (%21,65), tarım arazisi (%12,79) ve diğer arazi kullanım tipleri (%4,38) olduğunu ve noktasal olmayan kaynak kirliliği öncelikle su kaynağı koruma bölgesindeki kırsal yaşamdan kaynaklandığını tespit edilmiştir.

Tong vd., (2023) Çin'de yaklaşık %27,6'sı tarım arazisi olan Tongyang nehir havzasının yeni bir hidrolojik su kalitesi modelini kullanmıştır. Model, hidrolojik süreçleri ve fosfor taşınımını simüle etmek için uygulanmıştır. Model performansı tahmin edilen deşarj ve toplam fosfor konsantrasyonlarının 3 yıl boyunca ölçülen verilerle karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Model kalibrasyonundan sonra, tahmin edilen sonuçların akış debisi ve toplam fosfor konsantrasyonu açısından saha gözlemleriyle iyi bir şekilde karşılaştırıldığı bulunmuştur. Duyarlılık analizi sonucunda; çekilme katsayısının, yüzeysel akışın kirletici çekilme katsayısı, taşkın pikinin varış zamanını, besin maddesi konsantrasyonu pik süresini ve su kalitesi parametrelerinin önemli olduğu tespit edilmiştir.

Zhang vd. (2024) Ningxia'daki Sarı Nehir Sulama Alanı Drenaj Kanalında yaptıkları bir araştırmada, akış suyu kalitesi izleme ağı kurmuşlar ve yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama teknolojisi ve toprak- su değerlendirme modeli (SWAT) ile birleştirerek kapsamlı bir şekilde tarımsal noktasal olmayan kaynak kirliliği izleme modeli oluşturmuşlardır.

Çalışma sonucunda toplam kirleticiler içerisinde tarımsal sulamanın %92,88'ini oluşturduğunu belirtilmiştir.

Kentsel noktasal olmayan kaynaklar, kentsel yüzeylerden yoğun yağışın aşındırma etkisi altında yüzey akışı veya drenaj sistemleri aracılığıyla alıcı havzaya ulaşması şeklinde etki etmektedir (Huang vd., 2022). Hızlı kentleşme, geçirimsiz yüzeylerde önemli bir artışa yol açarak, sızmanın azalması, akış hacmini artırması ve ulaştığı toprak yüzeylerde toprak erozyonuna ve besin kaybına neden olmaktadır (Huang vd., 2022; Panagos vd., 2022).

Kim vd. (2024) Güney Kore'nin Gyeonggi-do eyaletinin başkenti ve en büyük şehri olan Suwon 'da 2010-2020 yılları arasında kentsel su döngüsünün iyileştirilmesi ve noktasal olmayan kaynak kirliliğinin azaltılması için uygulanan çeşitli projeleri incelemişlerdir. Toplam fosfor (TP) konsantrasyonlarının, büyük ölçekli kanalizasyon projeleri ve noktasal olmayan kaynak kirliliği azaltma projelerinin teşvik edilmesi nedeniyle azaldığı gözlemlenmiştir.

Wang vd. (2025) yaptıkları çalışmada 41 Çin şehrindeki yollar ve çatılardaki akış kirliliği göstergelerinin özelliklerini incelemek için bir meta-analiz yürütmüşler ve kirlilik seviyelerindeki coğrafi farklılıkları ve bunları etkileyen faktörlerin katkı oranlarını ortaya çıkarmak için güçlendirilmiş bir regresyon ağacı modeli kullanmışlardır. Sonuç olarak, TP (0,6 mg/L) ortalama konsantrasyonunun çatı akışından ziyade yol akışında önemli ölçüde daha fazla olduğunu (yaklaşık 3,2 kat) ortaya koymuştur.

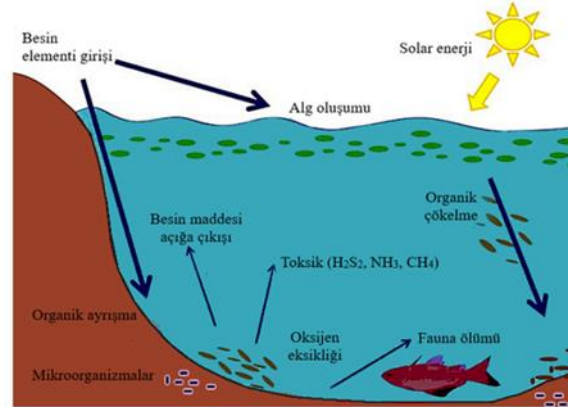
Hu vd. (2024) Pekin-Hangzhou Büyük Kanalı'nın Changzhou bölümündeki su kirliliği özellikleri, ötrofikasyon seviyesi ve kirliliğin birincil kaynakları hakkında kapsamlı bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Nehir kirliliğinin sel mevsimi ile sel olmayan mevsim arasında önemli ölçüde farklı olduğunu, sel olmayan mevsimde, daha düşük su sıcaklığı ve daha yüksek çözünmüş oksijen seviyeleri gözlenmiştir. Ancak, NH₃-N, TP ve TN konsantrasyonları nispeten yüksek ve bu da bu dönemde daha şiddetli kirliliği göstermiştir.

Atmosferde taşınan partikül fosfor, aerosoller, partikül madde (kuru birikim) ve yağış (ıslak birikim) yoluyla havzaya ulaşmaktadır. Bu birikintilerin başlıca kaynakları arasında yakıt yanması, mineral toz ve bitki emisyonları bulunmaktadır (Li vd., 2020; Li vd., 2022). Atmosferdeki fosfor konsantrasyonunun nispeten düşük olmakla birlikte, havzalara ek fosfor girdisi sağlayabilir ve böylece su sisteminin ötrofikasyonunu hızlandırabilmektedir (Chiwa, 2020).

Jarosiewicz & Witek (2016), yağıştaki fosfor fosfor konsantrasyonunu belirleyerek Polonya'nın kuzeyinde bulunan üç çalışma sahasında yıllık P birikim oranını hesaplamışlardır. Çalışma bölgesinde tahmini yıllık P birikim oranı 0,1 ila 0,39 kg/ha arasında değişmiş ve fosfor birikimi ile çalışma sahası yakınındaki ekilebilir arazi arasında güçlü bir şekilde pozitif korelasyon olduğu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca bölgedeki mineral fosfor gübre tüketimiyle pozitif korelasyon gösterdiğini tespit edilmiş; en düşük ekilen arazi yüzdesi ve en düşük mineral gübre tüketiminin olduğu alanda 0,015 mg/l'den, ekilebilir arazilerin tarım arazisinin %84'ünü oluşturduğu ve mineral fosfor gübre tüketiminin 33 kg/ha'yı aştığı alanda 0,046 mg/l'ye kadar değişmiştir. Atmosferik fosfor birikimi, toplam P'nin yıllık toplam girdilerinin %2,1-5,6'sını temsil ettiği belirtilmiştir.

2.2. Fosfor Kirliliğinin Etkileri

Fosfor birçok su kütlesi (göl, nehir, rezervuar) ve deşarja maruz kalan kıyı sularında alg oluşumu için sınırlayıcı etmendir. Artan deniz yosunları nedeniyle, güneş ışığının geçişini engellemektedir. Fotosentezin durmasıyla da sıvıdaki oksijen azalmakta ve sonuçta omurgasız sucul canlılar ve balıklar yok olabilmektedir (Meral & Çanga, 2024) (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Sularda Fosfor Kirliliği Etkilerinin Şematik Görünüşü

Su bitkileri ve algler için fosfor gerekli bir besin elementidir. Fakat; fosforun suya fazla taşınımı ötrifikasyon oluşumunu hızlandırmaktadır. Fitoplankton artışı beraberinde balıklar, mikroorganizmalar, böcekler ve diğer su canlıları bu olumsuzluklardan sırasıyla etkilenmektedir. Fitoplankton ve mikroorganizmaların artışı, toksin salgılayan siyanobakterileri de barındıran alg patlamalarına ve alglerin çökerek dip sulardaki çözünmüş oksijeni azalmasına neden olmaktadır. Böylelikle ötrifikasyon; suların tadını ve rengini bozup, faydalı gıda ürünleri olan balık ve kabuklu canlı türlerinde de azalmaya neden

olmaktadır. Ayrıca organik maddelerin oksijensiz ortamda parçalanmasıyla ortamda metan, amonyak ve hidrojen sülfür gibi kötü kokan gazlar türemektedir. Bu gazlar da su canlıları üzerinde toksik etki oluşturmaktadır. Ötrifikasyon sebebiyle deniz yosunları artarak, güneş ışığının geçişini engellemektedir. Fotosentezin durmasıyla da sıvıdaki oksijen azalmakta ve sonuçta omurgasız sucul canlılar ve balıklar yok olabilmektedir (Penn, vd. 2012; Dirim, 2006; G. Atıcı, 2023). Ötrifikasyonun belirtileri arasında primer produktivitedeki artış, alg patlamaları, yüksek turbidite ve anoksik koşullar, su kütlelerinin dip tabakalarındaki detritus çürümelerinden kaynaklanan balık ölümleri sayılabilir. Ötrifikasyon çeşitli yollarla insan ve hayvanlarda sağlık sorunlarına yol açabilir; özellikle ötrifikasyona uğramış su külesinden içme suyu temini, sağlığı tehdit etmektedir. Ayrıca estetik ve ekonomik açıdan da olumsuzluk boyutu söz konusudur (Li vd., 2021).

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde yerüstü sularında ve atık sularda izin verilen Fosfat ve Toplam Fosfor sınırları verilmiştir (Anonim 2023). (Tablo 2.1. ve 2.2.)

Tablo 2.1. 1/2/2023 Tarih ve 32091 Sayılı Resmi Gazetede Yayınlanan Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği

Su Kalite Parametreleri	Su Kalite Sınıfları		
	I (çok iyi)	II (iyi)	III (orta)
Orto fosfat fosforu (mg oPO ₄ -P/L)	< 0,05	0,16	> 0,16
Toplam fosfor (mg P/L)	< 0,08	0,2	> 0,2

Tablo 2.2. 12/5/2023 Tarih ve 32188 Sayılı Resmi Gazetede Yayınlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği

ATIKSULARIN ALICI ORTAMA DEŞARJ STANDARTLARI	FOSFAT FOSFORU (PO₄-P), mg/L	TOPLAM FOSFOR (P), mg/L
Gıda Sanayii (Büyükbaş, Küçükbaş Hayvan Besiciliği ve Tavukhaneler)	3	
Kömür Hazırlama, İşleme ve Enerji Üretme Tesisleri (Termik Santraller ve Benzerleri)		8
Kömür Hazırlama, İşleme ve Enerji Üretme Tesisleri (Fuel-Oil ve Kömürle Çalışan Buhar Kazanları Soğutma Suları)		8
Azot ve Diğer Nutrientleri İçeren Kompoze Gübre Üretimi	35	
Fosforik Asit ve/veya Fosfatlı Kayadan Fosfatlı Gübre Üretimi	35	
Kimya Sanayii (Plastik Maddelerin İşlenmesi ve Plastik Malzeme Üretimi)		2,5
Kimya Sanayii (Deterjan Üretimi ve Benzerleri)		2
Karışık Endüstriyel Atıksuların Alıcı Ortama Deşarj Standartları (Küçük Ve Büyük Organize Sanayi Bölgeleri Ve Sektör Belirlemesi Yapılamayan Diğer Sanayiler)		2
Endüstriyel Nitelikli Diğer Atıksular (Atık Düzenli Depolama ve Bertaraf Tesisleri)		2
Biyodizel Tesisleri		2
Endüstriyel Nitelikli Diğer Atıksular (İçmesuyu Dolum ve Damacana Yıkama Tesisleri)		2
Endüstriyel Nitelikli Diğer Atıksular (Çamaşırhane ve Halı Yıkama Tesisleri)		2
Endüstriyel Nitelikli Diğer Atıksular (Petrol Türevli Atıksular-Atık Kabul Tesisleri)		2
Atıksuların Atıksu Altyapı Tesislerine Deşarjında Öngörülen Atıksu Standartları		10

Söz konusu yönetmelik kriterleri dikkate alınarak Atıcı (2020) tarafından kapalı bir havza özelliğinde olan Van Gölü Havzası içerisindeki Dönerdere, Yumruklu, Dolutaş ve Değirmigöl Göletlerini inceleyerek su kalitesi özellikleri araştırılmıştır. Çökmeden kalan

partiküller kolloidal ya da askıda katı maddeler olarak tanımlanmaktadır. Bu askıda katı maddeler dibe çökemeyecek kadar küçük ya da hafif maddelerdir ve suda bulanıklığın kaynağını oluşturmaktadır. Askıda katı maddeler canlı üzerinde yıpratıcı bir etki oluşturmakta, canlının zemin içinde gömülmesine ve solunum yetersizliğine bağlı olarak ölümlerine, sudaki ışık miktarını azaltarak beslenme verimliliğini ve davranış şeklini değiştirmekte, zemin yapısını bozarak tür dağılımının değişmesine neden olabilmektedir. YSKY'ye göre, askıda katı madde değeri baraj göllerinin ötrifikasyon kontrolü için 5 mg/L'nin altında olması gerektiği bildirilmiştir. Çalışmada AKM ortalama değeri 44,8±15,1 mg/L olurken, en yüksek AKM Dolutaş'ta 110,0 mg/L çıkmıştır. Bulanıklık ortalama değeri 41,3±22,7 NTU iken, en yüksek bulanıklık Dolutaş'ta 106,0 NTU olarak belirlenmiştir. Bulanıklık ortalama değeri AB ve BK'ye göre yüksek çıkarken, ortalama AKM değeri ise TS 266'ya göre yüksek çıkmıştır. Bütün gölet sularında AKM değerlerinin ötrifikasyon kontrolü için yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen veriler; Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY)'nde yer alan Kıtaçi Yüzeysel Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri, İnsani Tüketim Amaçlı Sular (TS 266), Avrupa Birliği Su Çevre Direktifi (AB), Birleşik Krallık İçme Suyu Kalite Kriterleri (BK) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'ne göre değerlendirilmiştir.

2.3. Sulardan Fosfor Giderim Yöntemleri

Atık sularda fosfor giderimi, kimyasal, fiziksel ve biyolojik yöntemler şeklinde sınıflandırılabilir. Fiziksel yöntemlerden; fosforu kristalleştirme, flotasyon, elektrodiyaliz ve ters osmoz sıkça kullanılmaktadır. Genel olarak, membran filtreler ve ters osmoz gibi fiziksel yöntemler pahalı olmakla birlikte son yıllarda, kirli suyun geri kazanımı ve yeniden kullanımındaki avantajları nedeniyle geniş uygulamalar için önemli bir potansiyel göstermiştir. Ancak, malzeme dengesi açısından, ters osmoz işlemi yüksek kalitede geri dönüştürülmüş su sağlarken aynı zamanda %20-%50 oranında atık konsantrasyonlu kirli su üretmektedir. Dahası bu atık sular yüksek konsantrasyonlarda organik madde ve tuzluluk içerir, tipik olarak besleme suyundan 6 ila 7 kat daha fazladır. Endokrin bozucu kimyasallar, ilaçlar ve pestisitler dahil olmak üzere mevcut organik bileşikler toksiktir ve önemli çevresel riskler oluşturur. Yükselen tuz konsantrasyonu hücre dehidrasyonuna yol açabilir ve ciddi ekotoksikolojik tehlikeler oluşturabilir. Bu nedenle ters osmoz yönteminde suyu iyileştirme ve çevre koruma hedeflerine ulaşmak için işlem sonucunda oluşan atık kirli suların makul bir seviyede tutulması önem arz etmektedir (Xu vd., 2024).

Adsorbsiyon yönteminin kullanılması günümüzde daha çok önem kazanmaktadır. Fosfor adsorpsiyon malzemelerinin adsorpsiyon mekanizması fiziksel adsorpsiyon ve kimyasal adsorpsiyon olarak ikiye ayrılabilir. Fiziksel adsorpsiyon, fosforun elektrostatik veya yerçekimi kuvvetleri aracılığıyla adsorpsiyon malzemelerinin yüzeyine çekilmesiyle meydana gelir, ancak kolayca desorbe edilebilir. Kimyasal adsorpsiyon, kimyasal bağ kuvvetlerine dayanır ve bu da onu kirleticilere karşı daha seçici ve desorpsiyona daha az eğilimli hale getirir. Tipik olarak, fosfor giderim işlemi sırasında hem fiziksel hem de kimyasal adsorpsiyon aynı anda meydana gelir (Zhang vd., 2011).

Fiziksel yöntemler küçük su kütlelerinde yaygın olarak kullanılır. Örneğin, mekanik pompalar alg hücrelerinin parçalanması ve kümelenmesinin önlenmesi için farklı su seviyeleri arasındaki karışımı hızlandırmak için kullanılabilir (Dillon & Molot, 2024). Ek olarak, katyonik flokülantlar algleri kümeleştirmek ve derin su alanlarına aktarmak için çökeltme katsayılarını iyileştirmek için kullanılabilir (Kroiss vd., 2011).

Biyolojik fosfor giderimi ise, aktif çamur sistemlerinde bulunan bakteri cinslerinden olan *Acinetobacter*, sudan fosforu uzaklaştırmada kullanılabilen bir diğer alternatiftir (Erdoğan, 2022). Biyolojik fosfor giderimi, giriş suyundaki fosforun biyokütle yapısına alınması ve oluşan bu biyokütlenin ilerleyen aşamalarda, çöktürme tankları yardımıyla sudan ayrılması ile fazla çamur olarak atılmasıdır. Hücre yapısına alınan fosfor, fazla çamurla birlikte sistemi terk etmekte, çıkış suyundaki fosfor konsantrasyonu deşarj kriterlerine indirilmektedir. Bazı mikroorganizmaların (PAO, fosfor biriktiren organizmalar) bünyelerinde fazla miktarda fosfor biriktiği bilinmektedir. Fosfor gideriminde esas olan, bu bakterilerin gelişmesini sağlamaktır. Bunun için, aerobik ve anoksik tanklardan önce bir anaerobik tank kullanılmaktadır. Anaerobik tanktaki bekletme süreleri 0,5-1,0 saat arasında değişebilmektedir (Sivrioğlu, 2010).

Fosfor giderimi için esas olarak uygun mikroorganizmaların kullanımına dayanan biyolojik yaklaşımlar, fiziksel ve kimyasal yöntemlerden daha çevre dostudur. Bu yöntem, düşük fosfor seviyelerinde daha az etkilidir çünkü düşük fosfor içeriği mikroorganizmaların metabolizması için yeterli değildir. Biyolojik arıtma işlemleri, optimum havalandırmayı sağlamak için özel bakım ve sıkı kontrol gerektirir. Karbon kaynaklarının ve mikroorganizma kültürünün olmaması bu yöntem için sınırlı faktörlerdir (Nobaharan vd., 2021; Zahed vd., 2022).

Biyolojik yöntemler, su ortamını yeniden dengelemek için zararlı alglerle rekabet eden veya onları avlayan su hayvanlarının ve mikroorganizmaların suya sokulmasını içermektedir (Huang vd., 2022). Ancak, bu yöntemlerin etkinliği nispeten yavaştır ve bazı durumlarda tür istilasına neden olabilmektedir (Song vd., 2023).

Kimyasal giderim ise, fosforun fosfat halinde kalsiyum, alüminyum ve demir iyonları tuzları ile çöktürülmesini hedeflemektedir (Ayar, 2009). Fosfor çöktürmede yaygın kullanılan kimyasal maddelerden bazıları; Ca bileşikleri ile Mg, Al ve Fe tuzlarıdır (Zeybek, 2019). Fakat temelde; atık sulardan P gideriminde; ters osmoz, elektrodiyaliz, adsorbant kullanımı, cüruf, arıtma çamuru, uçucu kül, kaolinit ve tarımsal atıktan elde edilen aktif karbonlar kullanılmaktadır. Aktif karbon üretiminde kullanılan tarımsal ham maddelerden bazıları; mısır koçanı, zeytin çekirdeği, pamuk sapı, meyve atıkları, şeker kamışı, buğday samanı, çeltik kabuğu, ayçiçek çekirdeği-fındık-badem kabuğudur (Zeybek, 2019; Atıcı, 2023). Diğer yöntemlere kıyasla adsorpsiyon, fosfor gideriminde daha başarılı ve ekonomiktir. Bu sebeple; son yıllarda, kolay ulaşılabilen ve ucuz materyallerle atık suların arındırılması denenmektedir (Çetin, 2013). Adsorpsiyon prosesinin ucuzluğu ve basitliği sebebiyle sıkça kullanılmaktadır. Atık sulardaki fosforu gidermede; özellikle biyokömür, hindistan cevizi kabuğu, kalsiyum karbonat, kalsiyum kaolinit, kırmızı çamur, yarı yanmış dolomit, uçucu kül, cüruf, zeolit, titanyum dioksit, kum ve süngertaşı oldukça başarılı olmuştur (Zeybek, 2019).

Zhang ve arkadaşları (2016), farklı hammaddelerden ve farklı sıcaklıklarda hazırlanan biyokömürler (bir doğal odunsu biyokömür ve sekiz yapay bitkisel kaynaklı biyokömür) tarafından fosforun emilimini araştırmışlardır. Sonuçları, incelenen dokuz biyokömür arasında yalnızca 20 dakikalık katı kalma süresiyle 720°C'de üretilen Mallee'den (*Eucalyptus polybractea*) türetilen biyokömürün yüksek fosfor tutma kabiliyeti gösterdiği belirtilmiştir. Mallee biyokömüründe fosfor emiliminin kinetik çalışmasından elde edilen bulgular, Mallee biyokömüründe fosfor emiliminin iki aşaması olduğunu göstermiş; hızlı bir kemisorpsiyon aşaması ve ardından yüzey emilim bölgeleri doygunluğa ulaştığında ise yüzey difüzyon kontrollü bir aşama gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Zhou vd., (2019) pirinç samanı, *Phragmites communis*, talaş ve yumurta kabuğu gibi bitkisel atıklardan yapılan ve çeşitli piroliz sıcaklıklarına (300, 500 ve 700°C) maruz bırakılan farklı biyokömürlerin fosfor tutma kapasitelerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, piroliz sıcaklığının biyokömürün fiziko-kimyasal özellikleri üzerindeki etkisinin hammaddeye göre değiştiğini göstermiştir. Bitkisel atıklardan elde edilen biyokömürler sınırlı bir tutma kapasitesine sahip olduğu hatta bazen tekrar fosfor saldıgı gözlemlenmiştir. Fosfor tutması

piroliz sıcaklığı ayarlanarak iyileştirilebileceği; piroliz sıcaklıklarında üretilen pirinç samanı (700°C), *Phragmites communis* (300°C) ve talaş (300°C) ürünleri maksimum fosfor tutması sırasıyla; 5,41, 7,75 ve 3,86 mg·g⁻¹ olarak belirlenmiştir. Yumurta kabuğu biyokömürünün daha az negatif yüke sahip olması ve daha büyük yüzey alanına sahip olması daha yüksek fosfor tutma kapasitesine olanak sağlamıştır.

Hollister vd., (2013) orijinal meşe biyokömürünün suyla ekstrakte edilen meşe biyokömüründen daha fazla fosforu adsorbe ettiğini bildirmiştir; bu, biyokömür yapısında bulunan metal katyonların fosfor sorpsiyon alanları sağladığını ancak ekstraksiyon sırasında soğuk suyla yıkandığını göstermektedir.

Jung vd., (2015) sulu çözeltilerden fosforu gidermek için farklı tipte biyokömürleri (meşe ağacı, bambu ağacı, mısır kalıntısı, soya fasulyesi sapı ve fıstık kabuğu) test etmişler ve sonuçları, yüksek Ca ve Mg içeriği nedeniyle fıstık kabuğu biyokömürünün fosfor gidermede en iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Shepherd vd., (2017) anaerobik olarak sindirilmiş kanalizasyon çamuru/aşındırıcı türevli biyokömür tarafından fosfor adsorpsiyonunun mekanizmalarını incelemiştir. Test edilen biyokömürlerdeki Fe mineralleriyle fosfor etkileşiminin sorpsiyonunu mümkün kılmak için çok önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Yao vd., (2013) şeker pancarı atıkları ve işlenmiş domates biyokömürlerinin yüksek Mg içeriği (%10 ve %2) nedeniyle fosfor adsorpsiyonu için yüksek bir performansa sahip olduğunu bildirmişlerdir. Fosforun yüksek adsorpsiyon kapasitesinin nedeni, pH'ı 12'den düşük olduğunda MgO'nun pozitif bir yüke sahip oluşu ve elektrostatik bağlanma yoluyla fosforu adsorbe etmesi olarak açıklanmıştır. Ayrıca, MgO'nun bir kısmı çözeltide çözünür ve Mg ile P arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar (çökeltme) P'nin uzaklaştırılmasına neden olmaktadır (Yao vd., 2011).

Yeşiltaş & Yılmaz (2019) yaptıkları araştırmada ticari olarak satışı olan aktif karbon malzemesi demir ile kaplanarak sentezlenen yeni malzeme (DKK) ile fosfor giderimi araştırılmıştır. Yapılan laboratuvar çalışmaları sonucunda DKK'nın sulu çözeltilerde fosfor gideriminde işlevsel olarak kullanılabilirliği anlaşılmıştır. Ayrıca malzemenin fosfor tutma kapasitesinin 4,26 mg PO₄³⁻/g DKK olduğu tespit edilmiştir. Adsorpsiyonun Langmuir matematiksel modeline uyduğu ve üretim için uygun şartların sağlanması ile birlikte ticari olarak üretiminin gerçekleştirilerek fosfor gideriminde yaygın olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Özellikle bazı kil çeşitleri, fosfor gideriminde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu örneklerden biri olup, Amerika'da bentonit adı verilen bu kil çeşidine, Fransa'nın Montmorillon bölgesinde de sıkça rastlanıldığından, burada bu kile montmorillonit de denmektedir. Bentonitin genel kimyasal formülü; $(\text{Na,Ca}) (\text{Al,Mg})_6 (\text{Si}_4\text{O}_{10})_3 (\text{OH})_6 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ şeklindedir (Ayar, 2009). Bentonitler, atık su arıtımında kullanılan en bol kil içeren malzemelerdir. Gerek ağır metal giderimi (bakır, kurşun, kadmiyum ve çinko) gerek fosfor gideriminde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Fosfor adsorpsiyonunu etkileyen en önemli faktörlerden birisi, pH'dır. Ayrıca, azalan sıcaklık da adsorpsiyon kapasitesini artırmaktadır (Ayar, 2009). Fosfor gideriminde kullanılacak en uygun adsorbentin seçiminde; adsorbentin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, fosforu adsorbe etme yeteneğine, maliyet ve elde etme kolaylığına dikkat edilmektedir (Çetin, 2013).

Elgarhy vd., (2022) doğal ve aktive edilmiş bentonitin (Na-bentonit) sulu ortamlarda inorganik ve organik fosfora (IP, OP) adsorpsiyon potansiyelini araştırmışlardır. Bulgular, Na-bentonitin, doğal bentonit için $74,21 \text{ m}^2 / \text{g}$ değerinden daha yüksek bir özgül alana ($138,51 \text{ m}^2/\text{g}$) sahip olduğunu; IP hem de OP adsorbentleri için maksimum emilimin, $\text{pH} = 6$ dengesinde, 40 ila 50 dakikalık temas süresinde, $40 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve sırasıyla 2 mg/L ve 1 mg/L doz oranında Na-bentonit ile gerçekleştiğini göstermiştir. Na-bentonitin, fosfor gideriminde doğal bentonitten daha etkili olduğu belirtilmiştir.

Mezbaha atık suyu (SWW), yüksek konsantrasyonlarda fosfor (P) içerir ve ötrifikasyona neden olan başlıca endüstriyel kirletici olarak kabul edilir. Sun vd., (2021) yaptıkları çalışmada, ana hammadde olarak baca gazı kükürt giderme alçısı (FGDG) ve katkı maddeleri olarak bentonit, kil, çelik cürufu ve uçucu kül kullanılarak iki tür ekonomik P giderim adsorbenti geliştirmişlerdir. %60 FGDG, %20 çelik cürufu ve %20 uçucu külden (DSGA2) oluşan adsorbentin maksimum adsorpsiyon kapasitesinin $15,85 \text{ mg P/g}$ olduğu bulunmuştur; bu, %60 FGDG, %30 bentonit ve %10 kil kullanılarak sentezlenen adsorbentin (DSGA1) 19 katıdır ($0,82 \text{ mg P/g}$). P giderim sürecinde yüzey adsorpsiyonu, iç difüzyon ve iyonik çözünme bir arada etkili bulunmuştur. Sonuçlar, DSGA2'nin pratik uygulamalarda SWW'den gelişmiş P giderimi için umut vadeden bir adsorbent olduğunu göstermiştir.

Fosfor giderimi, etkili su arıtımı ve ötrofikasyonun önlenmesi için kritik öneme sahiptir. Lin vd., (2024) çalışmalarında, fosfor adsorpsiyon kapasitesini artırmak için ekonomik bir kil malzemesi olan attapulgitin zirkonyum (Zr@ATP) ile modifikasyonuna odaklanmaktadır. Zr@ATP kapsamlı bir şekilde karakterize edilmiş ve fosfor giderim mekanizmaları araştırılmıştır. Ek olarak, su arıtımındaki performansı bir göl suyu-tortu

sistemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Zr@ATP, 329,29 m²/g'lık yüksek bir yüzey alanı sergilemiştir . Statik adsorpsiyon deneyleri, Zr@ATP'nin 5 g/L'lik bir adsorban dozajında %95,8'lik bir fosfor giderim verimliliğine ulaştığını ortaya koymuştur. Kinetik çalışmalar, adsorpsiyonun birincil mekanizmanın iyon değişimi yoluyla kemisorpsiyon olduğu bir yalancı ikinci dereceden modeli izlediğini göstermiştir. Bir göl suyu-tortu sistemine Zr@ATP uygulaması, toplam fosforda %83,6'lık bir azalma ile sonuçlanmıştır. Klorofil konsantrasyonu 32,33 µg/L'den 8,56 µg/L'ye önemli ölçüde düşmüş ve alg yoğunluğu %84,6 oranında azalarak alg büyümesini etkili bir şekilde engellenmiştir. Bu sonuçlar Zr@ATP'nin sucul ortamlarda sürdürülebilir fosfor giderimi ve ötrofikasyon kontrolü için umut vadeden bir adsorban olduğunu göstermektedir.

Kil minerallerinin yapısındaki hidratlı parçacıkların yüzey dağılımı, temel reaksiyon bölgeleri ve yüzey reaksiyonları (örneğin adsorpsiyon) termal modifikasyon yoluyla değiştirilerek daha uygun kil üretilebilmektedir. Termal modifikasyon; Kil yapısının ayrışmasına, hidrojen bağının kopmasına ve çok katmanlı yapının tahrip olmasına yol açan dehidroksilasyon olarak tanımlanabilir. Isıl işlem olarak da adlandırılan bu uygulama, ham kil minerallerinin belirli bir süre (genellikle 2-4 saat) belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasını içerir. Modifikasyonların meydana geldiği sıcaklıklar, modifiye edilen kilin tipine, içerdiği mineral gruplarına, parçacık boyutuna ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Kalpaklı vd., 2022).

Suda fosforu bentonit kiliyle gidermeyi deneme amaçlı birçok çalışma yapılmıştır (Ayar, 2009). En iyi giderimin, nötr pH'da olduğunu belirlemiştir. Sonuçta; fosfor gideriminde, fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin beraber etkin olduğu görülmüştür.

Li vd., (2013) Kaolin kili ve demir klorür karışımıyla fosfor gidermeyi farklı mollerle denemişlerdir. Bu çalışma, kömür uçucu külünden Al içeren düzenli mezogözenekli silika MCM-41'in sentezlenmesi kullanılmış; 10 pH değerinde hazırlanan malzemenin 0,98 cm³/g'lık en büyük gözenek hacmini, 1020 m²/g'lık en yüksek BET yüzey alanını ve en düşük Si/Al molar oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu malzeme fosfatlar için adsorban olarak kullanılmış ve adsorpsiyon kapasitesi 64,2 mg/g'a ulaştığı tespit edilmiştir

Dirim, (2006) Aşağı Kelkit Havzasında; bitkilerle sudaki fosforu gidermeyi amaçlamıştır. Ayrıca; laboratuvar çalışmasında denediği bitki türlerinden en fazla fosfor giderimini %84 ile *Lemna minor*, %75 ile *Ceratophyllum demersum* türlerinde tespit etmiş,

diğer türlerin sadece %50 civarında fosfor giderebildiğini belirlemiştir. *Typhaangustifolia* ise %18 oranıyla diğer türlerden daha düşük performans göstermiştir.

Rahman vd., (2021) düşük maliyetli Cennet ağacı (*Ailanthus altissima*)'nın, testere tozu, talaş atıklarını kimyasal olarak aktifleştirerek adsorplama kapasitesi açısından değerlendirmişlerdir. Çalışmada aktifleştirilmiş talaşın kirli sulardan başta boyalar olmak üzere atık maddelerin uzaklaştırılmasında uygun bir adsorban olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bangash & Alam, (2009) yine Cennet ağacından 100 °C ve 800 °C de elde ettiği karbonu asit mavisini gidermede kullanmışlardır.

Biyokömür (BC), tarım ve ormancılık atıkları gibi biyo kütleinin oksijensiz koşullar altında termal ayrışmasıyla oluşan, karbon açısından zengin, stabil bir üründür. İnce gözenek yapısı ile güçlü adsorpsiyon kapasitesine, düşük çözünürlüğe, kararlı fiziksel ve kimyasal özelliklere, zengin gözenek yapısına ve geniş spesifik yüzey alanına sahiptir. BC herhangi bir organik malzemedan yapılabilir; yaygın hammaddeler pirinç kabuğu, saman, hayvan gübresi, kanalizasyon çamuru ve diğer bazı tarımsal atıklardır. Azot ve fosforu etkili bir şekilde adsorbe eden ve uzaklaştıran bir adsorban olarak yaygın ilgi görmektedir (Dai vd., 2020).

Safa & Khan, (2020) atık suda on altı mikro kirleticiyi (boyalar, metaller, organofosfatlar, ilaçlar, pestisitler, gıda katkı maddeleri, yüzey aktif maddeler ve kozmetikler), azotu ve fosforu ortadan kaldırmada yedi farklı sorbentin (üç inorganik, üç organik ve bir biyopolimer) etkinliğini araştırmıştır. Maksimum fosfor giderimi (%73), alkali pH'ta Ca/pirinç unu ile dekore edilmiş biyokömür ile elde edilmiştir Diğer sorbentler ise ortalama bir fosfor giderim oranı göstermiştir.

İncelenen literatür ışığında sularda fosfor giderimi için kolay ulaşılabilir adsorband malzemelerinin kullanılması, modifikasyonları ve optimum kullanım koşullarının tespit edilmesinin gerekliliği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada Bilecik ili sınırları içerisinde yüksek rezerv ve üretim potansiyeli olan Lefke taşı, bentonit kili ve Cennet ağacı biyoçar materyallerinin sularda fosfor giderimi amaçlı kullanım olanakları incelenmiştir. Böylece hem etkin bir giderim hemde arıtma süreci doğal, çevreye zararsız ve ekonomik olarak gerçekleştirilirken; aynı zamanda bu ürünler katma değeri yükselttilerek kullanım alanları geliştirilmiş olacaktır.

3. MATERYAL METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Kullanılan Adsorban Maddeler

3.1.1.1. Lefke Taşı

Lefke taşı, Bilecik'in Osmaneli ilçe sınırlarında yer alan bej, sarımsı veya yeşilimsi orta ve ince tabakalı şeyl, marn, kiltası ve çamurtaşları ile ardalanmalı Paleosen görsel çökellerinin orta tabakalıdan masife değişen kalınlıklardaki kumtaşı düzeyleridir ve muhtemel rezerv değeri $2677,5 \times 10^6$ tondur (Selim vd., 2019). Yapı taşı olarak İstanbul Haydarpaşa tren garı, Eskişehir Hükümet Konağı, Bebek ve Bostancı camileri ile Osmaneli ilçe merkezi ve civarında bulunan cami, medrese, kilise ve evlerde yaygın olarak kullanılmıştır. Günümüzde ise taşın kullanımı sadece yapıların restorasyonu ve özel yapıların (Çeşme, köprü gibi) tasarımında kullanılmasına yöneliktir (Şahin & Akova, 2019). Çalışmada kullanılan Lefke taşı Osmaneli ilçesinde araziden elle toplanmıştır (Şekil 3.1.-3.3.)



Şekil 3.1. Lefke Taşı Doğal Görüntüsü



Şekil 3.2. Lefke Taşı Yakın Görüntüsü



Şekil 3.3. Termal Modifiye Lefke Taşı

3.1.1.2. Bentonit

Bentonit kolloidal özellikte ve yüksek plastisiteye sahip bir kil türüdür. Yoğunluğu yaklaşık 2.6 g/cm^3 olup kuvars, mika, feldispat, pirit ve bazı minerallerle birlikte bulunur. İnorganik ve organik molekül veya iyonları adsorplama ve değiştirme kapasiteli, katalitik aktivitesi yüksek olan bentonitler, çok farklı alanda endüstriyel hammadde olarak kullanılmaktadır (Demirtaş, 2007). Çalışmada adsorban olarak kullanılan Sodyum bentonit hammaddesi 0,5-2,5 mm olup BENTAŞ firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.4-3.6.).



Şekil 3.4. Bentonit (Firmadan Gelen)



Şekil 3.5. Bentonit (Analize Hazır Görüntüsü)



Şekil 3.6. Termal Modifiye Bentonit

3.1.1.3. Cennet Ağacı (*Ailanthus altissima*)

Cennet ağacı (*Ailanthus altissima*), Aslen Çin'den gelen birçok ülkede görülen istilacı bir bitkidir. Kirliliğe, nispeten düşük sıcaklıklara, kuraklığa, farklı toprak tiplerine adaptasyonu ve genel olarak düşük toprak kalitesine sahip alanlarda yayılmasına yol açmıştır (Stojanović vd., 2024). Bitkinin kök, gövde, meyve ve yapraklarının anti-anafilaktik, antioksidan, anti tümör ve anti-inflamatuvar gibi çeşitli farmakolojik aktivitelere sahip olduğu fitokimyasal çalışmalarla belirlenmiştir (Song vd., 2024).

Cennet ağacı diğer bitkilerin büyümesini engelleyen ailanthon adı verilen allelopatik bir kimyasal üretir. Diğer yandan güçlü postemergens herbisit aktivitesi ve toprakta hızla biyodegrade olması, onun doğal bir herbisit olarak geliştirilme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Heisey, 1996). Son yıllarda, lignoselülozik biyokütle uygun maliyetli ve

yaygın olarak bulunabilen karbon açısından zengin bir malzeme olarak kabul edilmiş ve çeşitli termokimyasal dönüşüm süreçleri yoluyla biyokömür üretiminde kullanılmıştır (Stojanović vd. 2024). Çalışmada kullanılan Cennet ağacı hammaddesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Tarımsal Uygulama ve Araştırma alanından temin edilmiştir (Şekil 3.7.-3.8.)



Şekil 3.7. Cennet Ağacı



Şekil 3.8. Cennet Ağacı Talaşı

3.1.2. Kullanılan Cihaz ve Kimyasal Maddeler

Kullanılan adsorbanların hazırlanması ve karakterizasyon tespiti için, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Mühendislik Fakültesi Laboratuvarında bulunan; Proliz cihazı, Kül fırını, BET, SEM, Elementel analiz cihazları kullanılmıştır. Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi Toprak

Bitki ve Su analiz laboratuvarında bulunan pH metre ve çalkalayıcı ve Fosfor analizleri için Şekil 3.9. da ki spektrofotometre cihazı kullanılmıştır.

Kullanılan kimyasal maddeler; Carlo Erba, Merck, Norateks, Tekkim firmalarından temin edilmiştir. Kimyasal maddeler analitik saflıktadır. pH ayarlaması için Sodyum Hidroksit (NaOH, 0,01M) ve Hidroklorik Asit (HCl, 0,01M) kullanılmıştır. Renk geliŐtirici için, amonyum molibdat, amonyum metavanadat kullanılmıştır. Stok fosfor çözeltisi olarak Norateks marka 1000 ppm fosfor çözeltisi kullanılmıştır. Adsorbanlar arası kıyaslama yapmak için, ticari FeSO₄ kimyasalı kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Spektrofotometre

3.2. Metod

3.2.1. Adsorbanların Hazırlanması

Bentonit (B) adsorbanı için sodyum bentonit porselen havanda kırıldıktan sonra 250 µm lik elekte elenmiŐtir. B adsorbanından sırasıyla %0,5 (B1), %2 (B2) ve %5 (B3) olmak üzere üç farklı doz kullanılmıştır.

Modifiye Bentonit (MB) için elenen bentonit kül fırınında 700 °C de 1 saat bekletilerek termal modifikasyon uygulanmıştır. MB adsorbanından sırasıyla %0,5 (MB1), %2 (MB2) ve %5 (MB3) olmak üzere üç farklı doz kullanılmıştır.

Lefke taşı (LT) adsorbanı için: doğal lefke taşı porselen havanda kırıldıktan sonra 250 µm lik elekte elenmiŐtir. LT adsorbanından sırasıyla %0,5 (LT1), %2 (LT2) ve %5 (LT3) olmak üzere üç farklı doz kullanılmıştır.

Modifiye Lefke taşı (MLT) için elenen lefke taşı benzer Şekilde kül fırınında 700 °C de 1 saat bekletilerek termal modifikasyon uygulanmıştır. MLT adsorbanından sırasıyla %0,5 (MLT1), %2 (MLT2) ve %5 (MLT3) olmak üzere üç farklı doz kullanılmıştır.

Biyoçar (B) adsorbantı için Cennet ağacı niversitemiz Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi arazisinden temin edilmiş doğrayıcıda ğtlmştr. ğtlen numuneler Varsan marka piroliz cihazında 500 C de 10 derece/dakika ısınma hızında 30 dakika da biyoçar haline getirilmiştir (şekil 3.10. ve şekil 3.11.). B adorbantından sırasıyla %0,2 (B1), %0,5 (B2) ve % 1 (B3) olmak üzere  farklı doz kullanılmıştır.



şekil 3.10. Piroliz Cihazı



şekil 3.11. Cennet Ağacı Biyoarı

Tanık uygulama olarak demir sülfat heptahidrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) sırasıyla (K1) 100 ppm, (K2) 150 ppm, (K3) 200 ppm olmak üzere üç farklı doz kullanılmıştır.

3.2.2. Fosfor Çözeltisinin hazırlanması

Uygulamalar yapay atık su ortamında yürütülmüştür. Bu amaçla farklı trofik düzeyler dikkate alınarak: 1000 ppm lik fosfor stoku kullanılarak sırasıyla; düşük (20 ppm), orta (40 ppm), yüksek (60 ppm) olmak üzere 3 farklı fosfor içerikli ortam hazırlanmıştır.

Ortamın pH'ının adsorban performanslarına etkisini belirlemek amacıyla: üç farklı su pH'ı (4, 7, 10) oluşturulmuştur.

3.2.3. Vanadomolibdofosforik Asit Metodu ile Fosfor Belirlenmesi

Fosfor analizleri: vanadomolibdo fosforik sarı renk metoduna göre spektrofotometre ile tayin edilecektir (Kacar & Kütük, 2010; Kavgacı, 2022; Kitson & Mellon, 1944). Yöntem aşamaları kısaca;

Solüsyon A: 2.5 gram Amonyum molibdat 30 ml saf suda çözülmüştür.

Solüsyon B: 0,125 gram Amonyum metavanadat 30 ml sıcak saf suda çözülmüştür.

Solüsyon A ve Solüsyon B birleştirilerek üzerine 33 ml HCL asit eklenmiştir. Tüm çözelti 100ml balon jöjede saf su ile çizgisine tamamlanmıştır.

Standart çözeltilerin hazırlanması için 50 mg/L P içeren stok çözeltiden 10 mL lik tüpler içerisinde 5 - 60 mg/L aralığında dört farklı fosfor içeriği olacak şekilde seyreltmeler yapıldıktan sonra üzerine 2 mL Solüsyon A + Solüsyon B eklenmiştir. Geri kalan kısım saf su ile 10 mL ye tamamlanmıştır.

Deney için 7 ml numuneye 2 ml A+B solüsyonu eklenip saf su ile 10ml tamamlandıktan sonra 10 dk bekledikten sonra 470 nm dalga boyunda spektrofotometre de okutulmuştur.

Hazırlanan adsorban katkılı atık sular sabit devirde (150 rpm) ve 60 dakika süreyle karışımı sağlanmış ve herbir test üçer tekerrürlü olarak yapılmıştır.

Fosfor giderim yüzdesi ve adsorbsiyon kapasite değerleri aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Giderim Verimi} = (\text{Co}-\text{Ce}) / \text{Co} \times 100$$

$$\text{Adsorbsiyon Kapasitesi} : q_e = (\text{Co}-\text{Ce}) \times V / m$$

q_e = Adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)

C_o = Adsorbatın (adsorplanan maddenin) başlangıç derişimi (mg/L)

C_e = Adsorbatın (adsorplanan maddenin) denge anındaki (adsorplanmadan kalan) derişimi (mg/L)

V = Çözelti hacmi (L)

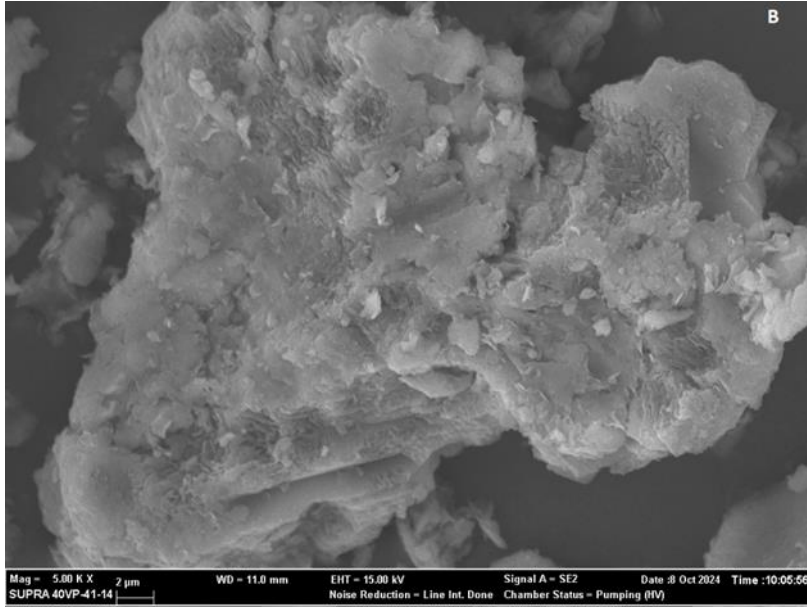
m = adsorbanın ağırlığı (g) (Volkan & Ozmetin, 2022).

Elde edilen sonuçlar Gomez and Gomez (1984) verilen ilkelere göre; uygulamaların istatistiksel karşılaştırılması SPSS paket programı kullanılarak Duncan çoklu t testi ile yapılmıştır.

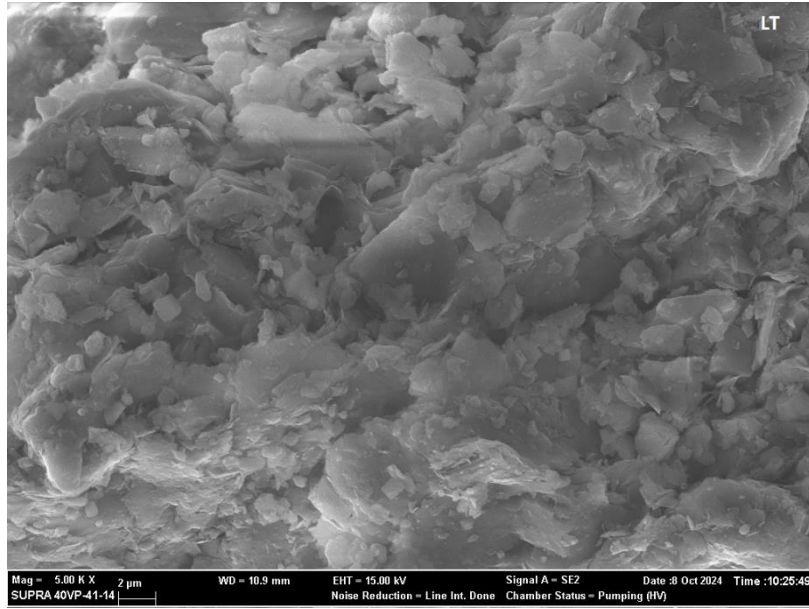
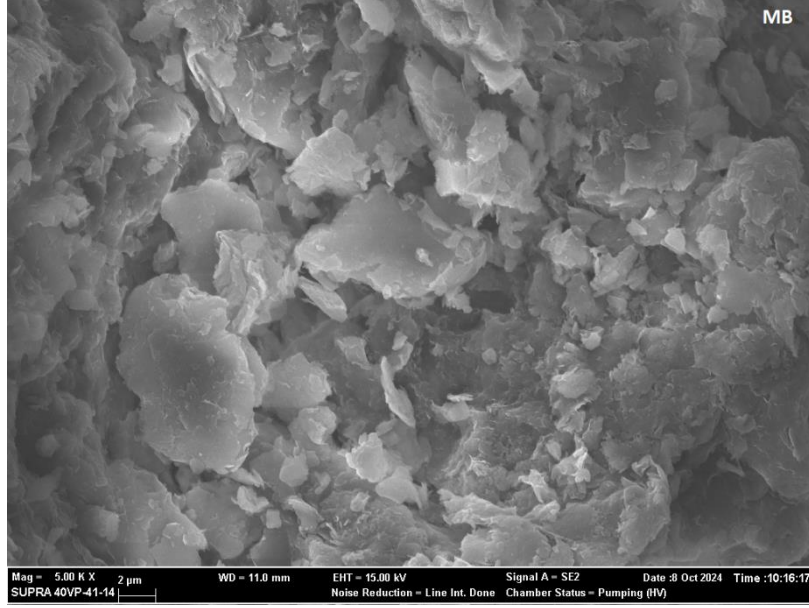
4. BULGULAR

4.1. Adsorbanların Karakterizasyonu

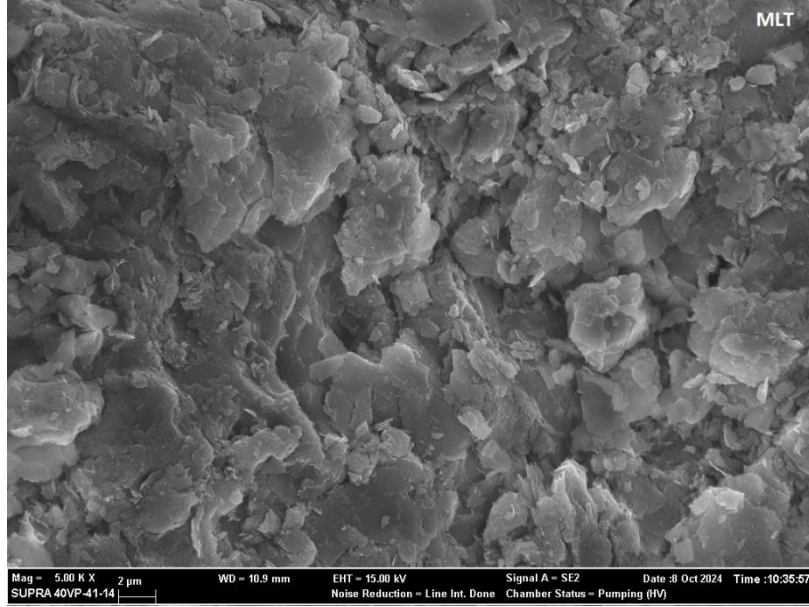
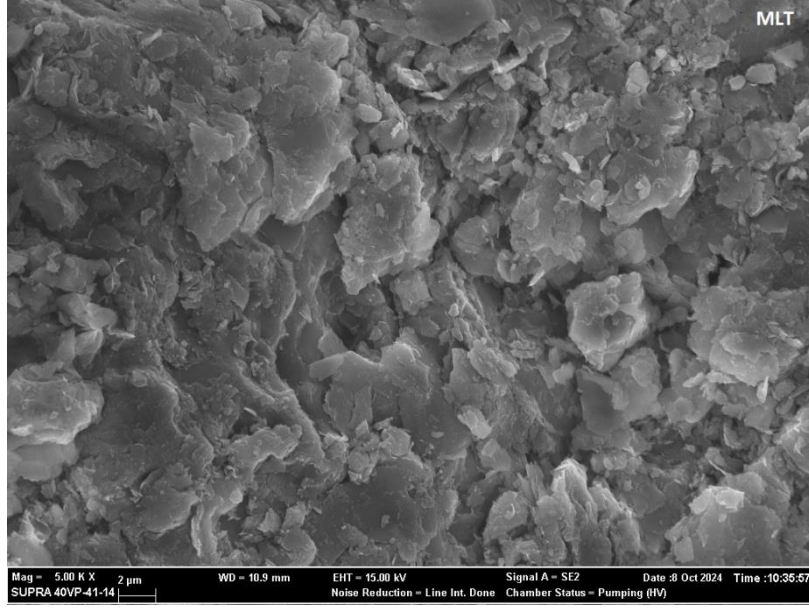
Çalışmada kullanılan her bir adsorban için elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.1. de verilmiştir. Bentonit ve Lefke taşına uygulanan termal modifikasyon uygulamasından sonra daha keskin sınırlar oluştuğu gözlenmiştir. BET analiz sonuçları (Tablo 4.1.) de dikkate alındığında MLT adsorbanında özgül yüzey alanının arttığı, MB ise bir değişim olmadığı sonucu elde edilmiştir. BÇ görüntüleri incelendiğinde ise katmanlı, geniş ve lifli bir yapıya sahip olduğu, pürüzsüzleşmeye doğru eğilim gösterdiğini görülmektedir.



Şekil 4.1. Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen adsorban yüzey görüntüleri (B: Bentonit, MB: modifiye bentonit, LT: Lefke Taşı, MLT: modifiye lefke taşı ve BÇ: Biyoçar)



Şekil 4.1. (Devamı) Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen adsorban yüzey görüntüleri
(B: Bentonit, MB: modifiye bentonit, LT: Lefke Taşı, MLT: modifiye lefke taşı ve BÇ:
Biyoçar)



Şekil 4.1. (Devamı) Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen adsorban yüzey görüntüleri (B: Bentonit, MB: modifiye bentonit, LT: Lefke Taşı, MLT: modifiye lefke taşı ve BÇ: Biyoçar)

Tablo 4.1. BET (Brunauer-Emmett-Teller) Analiz Sonuçları

Materyal	BET Yüzey Alanı (m ² /g)	Mikro Gözenek Hacmi (cm ³ /g)
B	130.12	0.096
MB	107.52	0.088
LT	112.82	0.032
MLT	138.55	0.035
BÇ	157.88	0.250

4.2. Fosfor giderim testi sonuçları

Her bir farklı fosfor içerikli çözelti kendi içinde içinde değerlendirilmiş olup farklı pH koşulu için elde edilen son fosfor içerikleri istatistiksel karşılaştırmaları ile birlikte Tablo 4.2.-4.4. de verilmiştir.

Tablo 4.2. Farklı Ph Koşullarında Başlangıç Fosfor İçeriği 20 ppm Olan Çözeltide Elde Edilen Son Fosfor Değerleri, (ppm)

20 ppm			
Materyal	pH		
	4	7	10
B1	16,348 b*	15,805 a	16,348 b
B2	15,900 c	11,957 a	15,120 b
B3	12,783 b	15,168 c	9,124 a
MB1	17,676 a	18,154 b	18,481 c
MB2	14,309 a	16,546 b	17,626 c
MB3	9,007 a	10,590 c	9,736 b
LT1	20,781 c	17,319 a	20,438 b
LT2	20,095 b	16,071 a	19,939 b
LT3	18,348 b	15,167 a	18,754 a
MLT1	2,944 a	3,866 b	3,789 b
MLT2	0,535 a	0,766 a	0,868 a
MLT3	0,510 a	0,715 b	0,945 c
BÇ1	11,612 a	17,294 b	17,116 b
BÇ2	11,409 a	17,141 b	17,040 b
BÇ3	11,739 a	17,497 c	15,214 b
K1	15,268 b	13,548 a	13,806 a
K2	14,515 c	12,151 b	9,549 a
K3	14,150 c	12,172 b	5,573 a

* Duncan testi gruplandırılması her bir satır kendi içinde yapılmıştır ($p < 0,05$)

pH değişiminin etkisi özelinde adsorban uygulamaları kendi içinde karşılaştırıldığında; K uygulamasında net etki görülmüş ve pH 10 koşulunda istatistiksel açıdan en iyi sonuç elde edilmiştir. BÇ, MB ve MLT uygulamalarında ise pH 4 koşulunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LT uygulamasında ise pH 7 koşulunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Farklı Ph Koşullarında Başlangıç Fosfor İçeriği 40 ppm Olan Çözeltilde Elde Edilen Son Fosfor Değerleri, (ppm)

40 ppm			
Materyal	pH		
	4	7	10
B1	39,973 c	34,063 b	31,035 a
B2	28,418 b	30,535 c	26,477 a
B3	27,242 c	24,066 a	26,301 b
MB1	35,840 c	34,607 b	34,049 a
MB2	30,615 c	29,881 b	28,706 a
MB3	22,453 b	22,248 b	19,782 a
LT1	37,577 b	35,815 a	35,924 a
LT2	33,837 b	34,379 a	34,677 a
LT3	29,798 a	31,939 c	30,909 b
MLT1	23,414 b	18,289 a	18,777 a
MLT2	0,392 a	2,616 ab	3,700 b
MLT3	0,094 a	0,989 b	0,067 a
BÇ1	38,069 a	39,038 b	39,253 b
BÇ2	38,123 a	39,819 c	39,307 b
BÇ3	38,823 a	40,249 c	39,603 b
K1	38,163 c	33,751 b	32,486 a
K2	37,028 c	32,589 b	30,525 a
K3	36,124 c	28,874 b	25,932 a

* Duncan testi gruplandırılması her bir satır kendi içinde yapılmıştır (p<0,05)

pH değişiminin etkisi 40 ppm başlangıç fosfor içeriği için adsorban uygulamaları kendi içinde karşılaştırıldığında; K ve MB uygulamalarında net etki görülmüş ve pH 10 koşulunda istatistiksel açıdan en iyi sonuçlar elde edilmiştir. B, LT ve MLT uygulamalarında ise çoğunlukla pH 10 koşulunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. BÇ uygulamasında ise pH 4 koşulunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4.4. Farklı Ph Koşullarında Başlangıç Fosfor İçeriği 60 ppm Olan Çözeltide Elde Edilen Son Fosfor Değerleri, (ppm)

60 ppm			
Materyal	pH		
	4	7	10
B1	61,206 c	56,709 b	54,325 a
B2	51,881 b	54,325 c	48,561 a
B3	56,468 c	54,204 b	50,855 a
MB1	63,164 c	59,132 b	57,423 a
MB2	50,999 b	51,477 c	48,709 a
MB3	38,662 c	36,715 b	33,331 a
LT1	61,844 b	56,993 a	56,811 a
LT2	56,114 b	54,992 a	56,235 b
LT3	53,112 a	53,476 ab	53,749 b
MLT1	49,031 c	39,223 b	37,138 a
MLT2	0,430 b	0,636 c	-0,186 a
MLT3	-0,891 a	-0,979 a	-0,862 a
BÇ1	63,417 b	61,043 a	61,111 a
BÇ2	61,687 a	61,179 a	61,179 a
BÇ3	62,772 b	61,043 a	61,111 a
K1	58,288 c	52,862 b	51,614 a
K2	56,199 c	47,598 a	48,738 b
K3	55,765 b	44,586 a	44,803 a

* Duncan testi gruplandırılması her bir satır kendi içinde yapılmıştır (p<0,05)

pH değişiminin etkisi 60 ppm başlangıç fosfor içeriği için adsorban uygulamaları kendi içinde karşılaştırıldığında; B ve MB, MLT, uygulamalarında net etki görülmüş ve pH 10 koşulunda istatistiksel açıdan en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LT uygulamasında pH 7 koşulunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. BÇ uygulamasında ise pH 7 ve pH 10 koşulunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Her bir farklı fosfor içerikli çözelti kendi içinde değerlendirilmiş olup farklı pH koşulu için elde edilen % giderim ve adsorbsiyon kapasite değerleri birlikte Tablo 4.5.-4.7. te verilmiştir. İstatistiksel karşılaştırma % giderim değerleri için yapılmıştır.

Tablo 4.5. Başlangıç Fosfor İçeriği 20 ppm Olan Çözeltilerde Elde Edilen % Giderim Ve Adsorbsiyon Kapasite Değerleri (qe)

Adsorban	pH					
	4		7		10	
	% giderim	Adsorbsiyon Kapasitesi (qe)	% giderim	Adsorbsiyon Kapasitesi (qe)	% giderim	Adsorbsiyon Kapasitesi (qe)
B1	18,260 ı*	0,730	20,975 g	0,839	18,260 ğ	0,244
B2	20,502 h	0,205	40,215 ç	0,402	24,398 g	0,218
B3	36,084 e	0,144	24,162 f	0,097	54,380 ç	0,304
MB1	11,618 i	0,465	9,231 j	0,369	7,597 i	0,730
MB2	28,454 f	0,285	17,272 h	0,173	11,869 ı	0,119
MB3	54,964 c	0,220	47,049 c	0,188	51,320 e	0,205
LT1	-3,906 l	-0,156	13,405 ii	0,536	-2,191 l	-0,088
LT2	-0,475 k	-0,005	19,643 ğ	0,196	0,305 k	0,003
LT3	8,258 j	0,033	24,166 f	0,097	6,231 j	0,025
MLT1	85,282 b	3,411	80,670 b	3,227	81,054 b	3,242
MLT2	97,323 a	0,973	96,170 a	0,962	95,658 a	0,957
MLT3	97,451 a	0,390	96,426 a	0,386	95,273 a	0,381
BÇ1	41,939 d	4,194	13,532 ii	1,353	14,419 h	1,442
BÇ2	42,953 ç	1,718	14,293 ı	0,572	14,800 h	0,592
BÇ3	41,305 d	0,826	12,517 i	0,250	23,931 g	0,479
K1	23,661 ğ	47,323	32,260 e	64,520	30,970 f	61,941
K2	27,423 g	36,564	39,247 çd	52,329	52,253 d	69,670
K3	29,251 f	29,251	39,139 d	39,139	72,137 c	72,137

* Duncan testi gruplandırılması her bir sütün kendi içinde yapılmıştır (p<0,05)

Başlangıç fosfor içeriği 20 ppm olan çözeltilerde yapılan testlerde tüm pH koşulunda en iyi giderim benzer şekilde MLT2 ve MLT3 uygulamasında, %95,273 -97,451 arasında oldukça yüksek değerler ile elde edilmiştir. Bu uygulamanın birinci dozu (MLT1) %80,67-85,286 değerleri ile ikinci sırada yer almıştır. Termal işlem görmemiş aynı adsorban LT uygulanmasında bu etki gözlenmemiştir.

B uygulamaları dozlar arası farklılık göstermiş en iyi sonucu B3 uygulamasında pH 4 koşulunda %36,084 değerinde gerçekleşmiştir. Bu değer pH 10 için %54,380 e kadar yükselmiştir. Termal işlem görmüş olan MB uygulaması ikinci ve 3. dozlarda B uygulamasına göre bir iyileşme gerçekleşmiş ve MB3 uygulamasında pH 4 koşulunda %54,964 değerine kadar yükselmiştir.

BÇ uygulamaları özellik pH 4 tüm dozlarda benzer olarak %41,305-42,953 arasında giderim gerçekleşmiştir. pH değerinin artmasıyla keskin bir şekilde bu değerlerde düşüş gözlenmiştir.

K uygulamalarında pH 4 koşulunda %23,661-29,251 arasında giderim gözlenmiş ve doz arttıkça istatistiksel açıdan önemli fark gözlenmiştir. Ayrıca pH yükseldikçe etki artmış ve pH 10 koşulunda K3 uygulamasında %72,137 değerine kadar yükselmiştir.

Tablo 4.6. Başlangıç Fosfor İçeriği 40 ppm Olan Çözeltide Elde Edilen % Giderim Ve Adsorbsiyon Kapasite Değerleri (qe)

Adsorban	pH					
	4		7		10	
	% giderim	Adsorbsiyon Kapasitesi (qe)	% giderim	Adsorbsiyon Kapasitesi (qe)	% giderim	Adsorbsiyon Kapasitesi (qe)
B1	0,068 k*	0,005	14,843 ii	1,187	22,414 f	1,793
B2	28,955 d	0,579	23,663 g	0,473	33,807 d	0,676
B3	31,896 ç	0,255	39,834 d	0,319	34,248 d	0,274
MB1	10,400 ğ	0,832	13,482 i	1,079	14,877 ğ	1,190
MB2	23,464 f	0,469	25,299 f	0,506	28,234 e	0,565
MB3	43,867 b	0,351	44,381 ç	0,355	50,546 ç	0,404
LT1	6,057 ı	0,485	10,462 j	0,837	10,191 h	0,815
LT2	15,409 g	0,308	14,053 i	0,281	13,308 ğ	0,266
LT3	25,506 e	0,204	20,152 ğ	0,161	22,727 f	0,182
MLT1	41,466 c	3,317	54,278 c	4,342	53,058 c	4,245
MLT2	99,020 a	1,980	93,461 b	1,869	90,749 b	1,815
MLT3	99,765 a	0,798	97,528 a	0,780	99,833 a	0,799
BÇ1	4,828 i	0,966	2,405 k	0,481	1,867 ı	0,373
BÇ2	4,693 i	0,375	0,454 l	0,036	1,732 ı	0,139
BÇ3	2,944 j	2,479	-0,623 l	-0,025	0,992 ı	0,040
K1	4,593 i	261,941	15,624 ı	62,494	18,785 g	75,138
K2	7,431 h	203,003	18,526 h	49,404	23,687 f	63,166
K3	9,689 ğ	172,137	27,816 e	55,631	35,170 d	70,339

* Duncan testi gruplandırılması her bir sütün kendi içinde yapılmıştır (p<0,05)

Başlangıç fosfor içeriği 40 ppm olan çözeltide yapılan testlerde pH 4 koşulunda en iyi giderim MLT2 ve MLT3 uygulamasında, %99,020 -99,765 arasında elde edilmiştir. Bu uygulamanın birinci dozu (MLT1) %41,466 değerleri ile üçüncü sırada yer almıştır. pH 7 ve pH 10 koşulunda ise en iyi giderim MLT3 uygulamasında, %97,528 -99,833 arasında, ikinci sırada MLT2 uygulamasında, %93,461-90,749 arasında gözlenmiştir. Termal işlem görmemiş aynı adsorban LT uygulanmasında ise giderim yüzdesi oldukça düşük gözlenmiştir.

B uygulamasında en iyi sonucu B3 uygulaması ph 4 koşulunda %31,896 değerinde gerçekleştirmiştir. Bu değer pH 7 ve pH 10 için sırasıyla %39,834-%34,248 bulunmuştur. Termal işlem görmüş olan MB uygulaması üçüncü dozlarda B uygulamasına göre bir iyileşme gerçekleşmiş ve MB3 uygulamasında pH 10 koşulunda %50,546 değerine kadar yükselmiştir.

BÇ uygulamaları pH 4 koşulunda daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. pH 4 koşulunda %2,944-4,828 arasında giderim gerçekleşmiştir

K uygulamalarında ph arttıkça giderim yüzdesinin arttığı gözlenmiştir. pH 10 koşulunda K3 uygulamasında %35,170 değerine ulaşmıştır.

Tablo 4.7. Başlangıç Fosfor İçeriği 60 ppm Olan Çözeltilerde Elde Edilen % Giderim Ve Adsorbsiyon Kapasite Değerleri (qe)

Adsorban	pH					
	4		7		10	
	% giderim	Adsorbsiyon Kapasitesi (qe)	% giderim	Adsorbsiyon Kapasitesi (qe)	% giderim	Adsorbsiyon Kapasitesi (qe)
B1	-2,010 h*	-0,241	5,485 i	0,658	9,458 h	1,135
B2	13,532 e	0,406	9,458 h	0,284	19,065 e	0,572
B3	5,887 g	0,071	9,659 h	0,116	15,242 f	0,183
MB1	-5,274 ı	-0,633	1,447 j	0,174	4,294 j	0,515
MB2	15,002 d	0,450	14,205 f	0,426	18,818 e	0,565
MB3	35,563 c	0,427	38,809 c	0,466	44,448 c	0,533
LT1	-3,074 h	-0,369	5,012 i	0,601	5,315 i	0,638
LT2	6,477 g	0,194	8,347 ı	0,250	6,275 ı	0,188
LT3	11,480 f	0,138	10,873 ğ	0,130	10,418 ğ	0,125
MLT1	18,281 ç	2,194	34,628 ç	4,155	38,103 ç	4,572
MLT2	99,283 b	2,978	98,940 b	2,968	100,311 b	3,009
MLT3	101,485 a	1,218	101,632 a	1,220	101,436 a	1,217
BÇ1	-5,695 ı	-1,708	-1,738 k	-0,521	-1,851 k	-0,555
BÇ2	-2,812 h	-0,337	-1,964 k	-0,236	-1,964 k	-0,236
BÇ3	-4,621 ı	-0,277	-1,738 k	-0,104	-1,851 k	-0,111
K1	2,853 ğ	17,117	11,897 g	71,382	13,977 g	83,863
K2	6,335 g	25,339	20,670 e	82,679	18,771 e	75,082
K3	7,058 g	21,175	25,689 d	77,068	25,328 d	75,983

* Duncan testi gruplandırılması her bir sütün kendi içinde yapılmıştır (p<0,05)

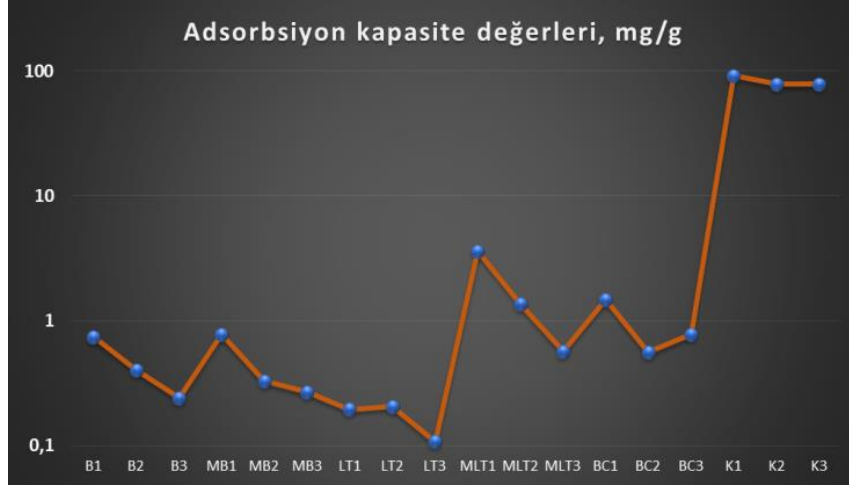
Başlangıç fosfor içeriği 60 ppm olan çözelti için diğer başlangıç dozlarında gözlemlendiği gibi en yüksek giderim tüm pH koşullarında MLT3 uygulamasında, %101,436-%100,632 değerleri arasında gözlenmiştir. Bu uygulamanın ikinci dozu (MLT2) %98,940-100,311 değerleri ile ikinci sırada yer almıştır. Termal işlem görmemiş aynı adsorban LT uygulanmasında bu etki gözlenmemiştir.

B adsorbanının giderim yüzdesi çok düşük olmasına karşın termal işlem görmüş olan MB uygulaması %35,563-%44,448 aralığında bulunmuş ve ph arttıkça bu değerlerde artış gözlenmiştir.

BÇ uygulamalarında 60 ppm başlangıç fosfor içeriğinde hiçbir pH değerinde giderim gözlenmemiştir.

K uygulamalarında ph 4 koşulunda %2,853-%7,058 arasında giderim gözlenmiş ve pH arttıkça %25,689 değerine kadar yükseldiği gözlenmiştir.

Grafik 4.1. Ortalama Adsorbsiyon Kapasite Değerleri



Adsorbsiyon kapasitesi düşükse bir birim konsantrasyonu fosfor düşürmek için daha fazla adsorban kullanmak gerekecektir. Bu durum; adsorban maliyeti, çevresel etkiler, sudan tekrar çökeltmesi ve arıtılması için gerekli işgücünün artışı gibi sakıncaları doğurmaktadır. Çalışmanın bulgularına göre;

MLT uygulaması ortalama adsorbsiyon kapasite değeri 3,59-0,57 arasında değişmiştir. Modifiye Bentonit adsorbsiyon kapasite değeri 0,77-0,27 arasında değişmiştir. Biyoçar adsorbsiyon kapasite değeri 1,48-0,55 arasında değişmiştir.

Bu değerler kimyasala göre oldukça düşük bulunmuştur (91,55-77,88). Ancak söz konusu adsorbanların doğal olarak elde ediliyor olması, ekonomik olması, rezervinin bol olması, çevresel olumsuz etkilerinin olmaması nedeniyle herhangi bir sorun teşkil etmemektedir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Elde edilen bulguları literatürdeki çalışmalarla tartışmak amacıyla Tablo 5.1.-5.2. hazırlanmıştır.

Tablo 5.1. Fosfor Giderimi Adsorpsiyon Çalışmaları ve pH Etkisi

Materyal	pH	Giderim Yüzdesi (%)	Adsorbsiyon Kapasitesi (mg/g)	Kaynak
Doğal Bentonit/ Na Bentonit	6	Doğal Bentonit IP ve OP: %85, %42 Na Bentonit IP ve OP: %81, %38	Doğal Bentonit IP ve OP: 1,85, 1,27 Na Bentonit IP ve OP: 3,75, 7,73	(Elgarhy vd., 2022)
MS (Fe-modifiye edilmiş soya fasülyesi samanı biyokömürü) MR (Fe-modifiye edilmiş kolza samanı biyokömürü) MP (Fe-modifiye edilmiş fıstık kabuğu biyokömürü)	7	MS: %97,76 MP: %90,23 MR: %86,23		(Qian vd., 2023)
Doğal ve modifiye kömür atıkları (CP, CNP, MCNP, ZP, ZNP ve MZNP)	2-6		0,36, 3,23, 30,48 0,80, 2,84 ve 6,99	(Hosseinpour vd., 2023)
Şeker Kamışı Posasının Demir Oksit Modifiyeli Biyokömürü (BIBC)	5-7	97,8	3,62	(Zhang vd., 2021)

Bentonit analiz sonuçları literatür bulgularına göre % giderimleri daha düşük gerçekleşmiştir. Modifiye edildiğinde sonuçlarda iyileşme gözlenmiştir. Literatüre benzer olarak pH değeri 7-10'da etkili olmuştur.

Biyoçar materyali için % giderimler literatüre göre düşük bulunmuştur. Etkili pH değeri ise 4 olup literatürle uyumludur.

Tablo 5.2. Fosfor Giderimi Adsorpsiyon Çalışmaları ve Termal Modifikasyon

Materyal	Termal Modifikasyon Sıcaklık/Süre	Giderim Yüzdesi (%)	Adsorbsiyon Kapasitesi (mg/g)	Kaynak
Doğal kırmızı kil (RC)	700 °C/ 2 Saat	98,42	9,92	(Cheng vd., 2025)
Doğal bentonit	800 °C/ 2 Saat	94	6,94	(Chen vd., 2018)
Marn/Traverten	1000 °C/ 1 Saat	99,95/99,98	1,99//1,93	(Gubernat vd., 2023)

Çalışmada termal modifikasyon özellikle Lefke taşında oldukça etkili olmuştur. % giderim değerleri %100 e ulaşmıştır. Literatürle uyumludur.

İncelenen literatürde termal modifikasyon bentonit için de etkili olduğu görülmektedir. Çalışmamızda bu etki sınırlı kalmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

1. Çözelti pH değeri adsorban performansına etkisi;

Adsorbanların genelinde ortam P içeriğine bağlı olarak pH etkisi farklılık göstermiştir. Kimyasal adsorban (K) uygulamaları tüm P içeriği koşullarında pH 10 değerinde en iyi sonucu vermiştir. Başlangıç fosfor içeriği 20 ppm olan koşulda; BÇ, MB ve MLT uygulamalarında ise pH 4 koşulunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LT uygulamasında ise pH 7 koşulunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Başlangıç fosfor içeriği 40 ppm koşulunda; B, MB, LT ve MLT uygulamalarında pH 10 koşulunda istatistiksel açıdan en iyi sonuçlar elde edilmiştir. BÇ uygulamasında ise pH 4 koşulunda en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Başlangıç fosfor içeriği 60 ppm koşulunda; B ve MB, MLT, uygulamalarında net etki görülmüş ve pH 10 koşulunda istatistiksel açıdan en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

2. Tüm adsorbanların çoklu karşılaştırılması;

Başlangıç fosfor içeriği 20 ppm olan koşulda; tüm pH koşulunda en iyi giderim MLT2 ve MLT3 uygulamasında, %95,273 -97,451 arasında oldukça yüksek değerler ile elde edilmiştir. Termal işlem görmemiş aynı adsorban LT uygulanmasında bu etki gözlenmemiştir. Bunu sırasıyla %72,137 ile K, %54,964 ile MB3 ve %54,380 ile B uygulaması takip etmiştir. Burada da adsorban dozları arasında genel olarak farklılık bulunmuş; doz arttıkça etkiye artmıştır. Başlangıç fosfor içeriği 40 ppm olan koşulda; en iyi giderim MLT2 ve MLT3 uygulamasında, %99,020 -99,833 arasında elde edilmiştir. Termal işlem görmemiş aynı adsorban LT uygulanmasında ise giderim yüzdesi oldukça düşük gözlenmiştir. Bunu

%50,546 ile MB3 uygulaması takip etmiştir. Çözelti P içeriğinin artması ile diğer adsorbanların % giderim değerleri düşmüştür. Başlangıç fosfor içeriği 60 ppm olan koşulda MLT uygulamaları %98,940 -100 arasında bir giderim sağlamıştır. %100 üzerinde elde edilen değerler ölçüm sapması olarak kabul edilmiştir. Bunu ile %44,448 ile MB3 uygulaması takip etmiştir. Çözelti P içeriğinin artması ile diğer adsorbanların % giderim değerleri düşmüştür.

Çalışma sonuçlarına göre Bilecik ilinde önemli miktarda rezervi olan Lefke taşının termal modifiye uygulanmış halinin atık sularda fosfor giderimi için çok etkin bir adsorban olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır. Artan fosfor içeriğine bağlı olarak da kullanılacak adsorban dozunun ayarlanması önemli bulunmuştur.

İkinci öneri olarak Bentonit kilinin termal modifikasyonunun uygun dozlarda kullanılması durumunda %54,964 düzeyinde fosfor giderimi sağlayabileceği söylenebilir.

Son olarak yörede istilacı şekilde yetişen cennet ağacından elde edilen Biyoçar adsorbanı düşük pH ortamında ve uygun dozda %42,953 düzeyinde fosfor giderimi sağladığı görülmüştür. Bu kaynakların kullanılması ekonomik, kolay ulaşılabilir olması ve doğal materyaller olması yönüyle de büyük avantajlar sağlayacaktır.

İlerleyen çalışmalarda; benzer denemelerin gerçek atık su ortamında yürütülmesi, adsorban etkinliğini artıracak farklı termal veya kimyasal modifikasyon uygulamaları üzerinde durulması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Atıcı, A. A. (2020). Dönerdere, Yumruklu, Değirmigöl ve Dolutaş Göletlerinin (Van, Türkiye) Su Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5(3), 348-355.

Atıcı, G. (2023). *Zeolit ve talaşın atık sularından azot ve fosfor giderim performansının belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi, YÖK Ulusal Tez Merkezi. (Yayın No. 777845).

Ayar, E. (2009). Removal of phosphorus by adsorption from aqueous medium using bentonite clay. *MSc, Süleyman Demirel University, Isparta, Turkey.*

Bangash, F., & Alam, S. (2009). Adsorption of acid blue 1 on activated carbon produced from the wood of *Ailanthus altissima*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26, 275-285.

Bouwman, L., Goldewijk, K. K., Van Der Hoek, K. W., Beusen, A. H., Van Vuuren, D. P., Willems, J., Stehfest, E. (2013). Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), 20882-20887.

Chen, M., Chen, J., & Sun, F. (2008). Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China. *Science of the Total Environment*, 405(1-3), 140-152.

Chen, X., Wu, L., Liu, F., Luo, P., Zhuang, X., Wu, J., ... & Xie, G. (2018). Performance and mechanisms of thermally treated bentonite for enhanced phosphate removal from wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 15980-15989.

Cheng, K., You, Q., Zou, L., Zhang, Y., Wang, P., & Zhang, W. (2025). High-temperature calcination modified red clay as an efficient adsorbent for phosphate removal from water. *Environmental Research*, 268, 120704.

Chiwa, M. (2020). Ten-year determination of atmospheric phosphorus deposition at three forested sites in Japan. *Atmospheric Environment*, 223, 117247.

Çetin, P. (2013). *İçme sularından fosfor giderimi için yeni bir yöntem geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). İstanbul Teknik Üniversitesi, YÖK Ulusal Tez Merkezi. Yayın No. 352277. Geliş tarihi gönderen Yayın No. 352277.

Dai, Y., Wang, W., Lu, L., Yan, L., & Yu, D. (2020). Utilization of biochar for the removal of nitrogen and phosphorus. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120573.

Demirtaş, E. (2007). *Sodyum bentonit ile bazı iletken polimerlerin kompozitlerinin sentezi ve özelliklerinin iyileştirilmesi*.

Dillon, P. J., & Molot, L. A. (2024). The phosphorus cycle. İçinde *Wetzel's Limnology* (ss. 359-425). Elsevier.

Ding, L., Qi, C., & Zhang, W. (2023). Distribution characteristics of non-point source pollution of TP and identification of key source areas in Nanyi Lake (China) Basin: Based on InVEST model and source list method. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(55), 117464-117484.

Dirim, S. (2006). *Aşağı Kelkit havzası doğal sulak alanında bitkilerle fosfor gideriminin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, YÖK Ulusal Tez Merkezi. (Yayın No. 181870).

Elgarhy, A. H., Mahran, B. N., Liu, G., Salem, T. A., ElSayed, E. E., & Ibrahim, L. A. (2022). Comparative study for removal of phosphorus from aqueous solution by natural and activated bentonite. *Scientific Reports*, 12(1), 19433.

Erdoğan, Ö. K. (2022). *Antalya ili evsel atıksu arıtma tesislerinde azot-fosfor giderim performanslarının değerlendirilmesi ve optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, YÖK Ulusal Tez Merkezi. (Yayın No. 744278).

Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. John Wiley & Sons.

Gubernat, S., Masłoń, A., Czarnota, J., Koszelnik, P., Chutkowski, M., Tupaj, M., ... & Galek, T. (2023). Removal of phosphorus with the use of marl and travertine and their thermally modified forms—factors affecting the sorption capacity of materials and the kinetics of the sorption process. *Materials*, 16(3), 1225.

Heisey, R. M. (1996). Identification of an allelopathic compound from *Ailanthus altissima* (Simaroubaceae) and characterization of its herbicidal activity. *American Journal of Botany*, 83(2), 192-200.

Hollister, C. C., Bisogni, J. J., & Lehmann, J. (2013). Ammonium, nitrate, and phosphate sorption to and solute leaching from biochars prepared from corn stover (*Zea mays* L.) and oak wood (*Quercus* spp.). *Journal of environmental quality*, 42(1), 137-144.

- Hosseinpour, S., Hejazi-Mehrizi, M., Hashemipour, H., & Farpoor, M. H.** (2023). Adsorptive removal of phosphorus from aqueous solutions using natural and modified coal solid wastes. *Water Science & Technology*, 87(6), 1376-1392.
- Hou, L., Zhou, Z., Wang, R., Li, J., Dong, F., & Liu, J.** (2022). Research on the non-point source pollution characteristics of important drinking water sources. *Water*, 14(2), 211.
- Hu, H., Zhou, G., Tong, S., & Hu, T.** (2024). Pollution Characteristics and Eutrophication Assessment in Plain River Network Areas: A Case Study of the Beijing–Hangzhou Grand Canal (Changzhou Section). *Water*, 16(23), 3353.
- Huang, L., Han, X., Wang, X., Zhang, Y., Yang, J., Feng, A., ... Zhu, N.** (2022). Coupling with high-resolution remote sensing data to evaluate urban non-point source pollution in Tongzhou, China. *Science of the Total Environment*, 831, 154632.
- Hussain, M. Z., Hamilton, S. K., Robertson, G. P., & Basso, B.** (2021). Phosphorus availability and leaching losses in annual and perennial cropping systems in an upper US Midwest landscape. *Scientific Reports*, 11(1), 20367.
- Jagemma, M., Worku, H., Gemed, F., & Gemed, B.** (2023). Variability in space effects of industrial wastewater on river physicochemical characteristics in a sample of towns of Oromia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(12), 13299-13306.
- Jarosiewicz, A., & Witek, Z.** (2016). Is the atmosphere an important source of phosphorus in northern Poland? *Soil & Water Research*, 11(2).
- Jung, K.-W., Hwang, M.-J., Ahn, K.-H., & Ok, Y.-S.** (2015). Kinetic study on phosphate removal from aqueous solution by biochar derived from peanut shell as renewable adsorptive media. *International journal of environmental science and technology*, 12, 3363-3372.
- Kacar, B., & Kütük, C.** (2010). *Gübre analizleri*. Nobel Yayın Dağıtım.
- Kalpaklı, Y., Topal, A., & Balkan, A.** (2022). Killer, modifikasyon yöntemleri ve asit aktivasyonu. *Ankara: İksad Yayıncılık*.
- Kavgacı, B.** (2022). *Ambalaj atıklarından elde edilen adsorbanlar aracılığıyla sulardan fosfor gideriminin incelenmesi* (Giresun Üniversitesi). Giresun Üniversitesi, YÖK Ulusal Tez Merkezi. Yayın No. 781312. Geliş tarihi gönderen Yayın No. 781312.

- Kim, J., Lee, J., Park, M., Min, J.-H., Lee, J. M., Jang, H., & Na, E. H.** (2024). The Impact of Non-Point Source (NPS) Management on Non-Point Source Reduction and Water Cycle Improvement in an Urban Area. *Sustainability*, *16*(3), 1248.
- Kinley, R. D., Gordon, R. J., Stratton, G. W., Patterson, G. T., & Hoyle, J.** (2007). Phosphorus losses through agricultural tile drainage in Nova Scotia, Canada. *Journal of Environmental Quality*, *36*(2), 469-477.
- Kitson, R. E., & Mellon, M. G.** (1944). Colorimetric determination of phosphorus as molybdivanadophosphoric acid. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, *16*(6), 379-383.
- Kroiss, H., Rechberger, H., & Egle, L.** (2011). Phosphorus in water quality and waste management. *Integrated waste management*, *2*, 181-214.
- Li, D., Min, H., Jiang, X., Ran, X., Zou, L., & Fan, J.** (2013). One-pot synthesis of Aluminum-containing ordered mesoporous silica MCM-41 using coal fly ash for phosphate adsorption. *Journal of colloid and interface science*, *404*, 42-48.
- Li, W., Li, B., Tao, S., Ciais, P., Piao, S., Shen, G., ... Balkanski, Y.** (2020). Missed atmospheric organic phosphorus emitted by terrestrial plants, part 2: Experiment of volatile phosphorus. *Environmental Pollution*, *258*, 113728.
- Li, W., Ouyang, F., An, G., Yang, C., Zhong, R., Xiao, F., ... & Wang, D.** (2021). Mechanism insight into the role of clay particles on enhancing phosphate removal by ferrate compared with ferric salt. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(33), 45414-45421.
- Li, Yong, Nan, X., Li, D., Wang, L., Xu, R., & Li, Q.** (2021). *Advances in the treatment of phosphorus-containing wastewater*. *647*(1), 012163. IOP Publishing.
- Li, Yuanyuan, Wang, H., Deng, Y., Liang, D., Li, Y., & Shen, Z.** (2022). How climate change and land-use evolution relates to the non-point source pollution in a typical watershed of China. *Science of the Total Environment*, *839*, 156375.
- Lin, C.-Y., Wu, W., & Shao, W.** (2024). Zirconium-Modified Attapulgite Composite for Phosphorus Removal and Algae Control in Lake Water. *Water*, *16*(22), 3233.
- Liu, D., & Gao, J.** (2022). InVEST MODEL-BASED EVALUATION OF RIVER NON-POINT SOURCE POLLUTION LOAD. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, *21*(2).

- Ma, X., Jiao, X., Sha, Z., Ding, F., Li, Y., Xu, W., ... Liu, X.** (2022). Characterization of atmospheric bulk phosphorus deposition in China. *Atmospheric Environment*, 279, 119127.
- Meral, R., Cemek, B., Apan, M., & Horuz, A.** (2004). *Effect of polyacrylamide (PAM) application under different flow types on sediment and NO₃-N surface transport at furrow irrigation.*
- Meral, Ramazan.** (2017). Karık Sulama Yönteminde Toprak Erozyonunu Önlemek İçin Uygun Akış Devisinin Belirlenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(1), 87-94.
- Meral & Çanga** (2024). Su Ürünlerinde Yeni Trendler, Sularda Adsorbsiyon Yöntemi İle Fosfor Giderimi, Orient Yayınları, Ankara, s. 167-181.
- Merdun, H.** (2012). Investigation of interactive effects on water flow and solute transport in sandy loam soil using time domain reflectometry. *Sensors*, 12(7), 9749-9772.
- Nobaharan, K., Bagheri Novair, S., Asgari Lajayer, B., & van Hullebusch, E. D.** (2021). Phosphorus removal from wastewater: The potential use of biochar and the key controlling factors. *Water*, 13(4), 517.
- Ongley, E. D., Xiaolan, Z., & Tao, Y.** (2010). Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China. *Environmental pollution*, 158(5), 1159-1168.
- Panagos, P., Muntwyler, A., Liakos, L., Borrelli, P., Biavetti, I., Bogonos, M., & Lugato, E.** (2022). Phosphorus plant removal from European agricultural land. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 17(1), 5-20.
- Penn, C. J., McGrath, J. M., Rounds, E., Fox, G., & Heeren, D.** (2012). Trapping phosphorus in runoff with a phosphorus removal structure. *Journal of Environmental Quality*, 41(3), 672-679.
- Qian, J., Zhou, X., Cai, Q., Zhao, J., & Huang, X.** (2023). The study of optimal adsorption conditions of phosphate on Fe-modified biochar by response surface methodology. *Molecules*, 28(5), 2323.
- Rahman, N. ur, Ullah, I., Alam, S., Khan, M. S., Shah, L. A., Zekker, I., ... Vincevica-Gaile, Z.** (2021). Activated ailanthus altissima sawdust as adsorbent for removal of acid yellow 29 from wastewater: Kinetics approach. *Water*, 13(15), 2136.

- Safa, Y., & Khan, T.** (2020). Adsorptive removal of nitrogen, phosphorus, and micropollutants in sewage wastewater by using different sorbents: Application of ANOVA. *Desalination and Water Treatment*, 180, 237-248.
- Selim, H., Karakaş, A., & Coruk, Ö.** (2019). Tarihi eserlerde doğal yapıtaşı olarak kullanılan Lefke taşının (Osmaneli/Bilecik) jeolojik ve mühendislik özellikleri. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(3), 1019-1032.
- Shepherd, J. G., Joseph, S., Sohi, S. P., & Heal, K. V.** (2017). Biochar and enhanced phosphate capture: Mapping mechanisms to functional properties. *Chemosphere*, 179, 57-74.
- Sivrioğlu, Ö.** (2010). *Yapay sulakalanlar ve diğer yöntemlerle azot ve fosfor gideriminin araştırılması*.
- Song, J., Xu, Z., Chen, Y., & Guo, J.** (2023). Nanoparticles, an emerging control method for harmful algal blooms: Current technologies, challenges, and perspectives. *Nanomaterials*, 13(16), 2384.
- Song, Q., Duan, Z.-K., Tan, Y.-N., Gao, Z.-H., Liu, D., Hao, J.-L., ... Song, S.-J.** (2024). Isolation of four new monoterpenes from *Ailanthus altissima* (mill.) Swingle and their enzyme inhibitory effects. *Fitoterapia*, 176, 105984.
- Stojanović, J., Milojević-Rakić, M., Bajuk-Bogdanović, D., Randelović, D., Otašević, B., Malenović, A., ... Protić, A.** (2024). Carbonization of Invasive Plant Species—Novel Route for Removal of Active Pharmaceutical Ingredients via Adsorption. *Processes*, 12(10), 2149.
- Sun, S., Feng, C., Tong, S., Zhao, Y., Chen, N., & Zhu, M.** (2021). Evaluation of advanced phosphorus removal from slaughterhouse wastewater using industrial waste-based adsorbents. *Water Science and Technology*, 83(6), 1407-1417.
- Şahin, G., & Akova, S. B.** (2019). Türkiye'nin Coğrafi İşaret Niteliğindeki Jeolojik Değerleri. *Asia Minor Studies*, 7(2), 335-354.
- Tong, X., Lai, X., & Liang, Q.** (2023). An improved non-point source pollution model for catchment-scale hydrological processes and phosphorus loads. *Journal of Hydrology*, 621, 129588.
- Tunçal, T., Pala, A., & Uslu, O.** (2008). Biyolojik aşırı fosfor giderimi temel özelliklerinin İzmir Atıksu Arıtma Tesisi'nde araştırılması. *Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi*, 18(1), 17-31.

- Volkan, N., & Ozmetin, E.** (2022). Maxilon Blue GRL boyar maddesinin illit kil minerali ile gideriminin optimizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(1), 216-232.
- Wang, Y., Li, C., Qiao, J., Hu, Y., Zhang, Q., Yin, J., & Slater, L.** (2025). Meta-analysis of urban non-point source pollution from road and roof runoff across China. *Earth's Future*, 13(3), e2024EF005296.
- Xu, H., Liu, C., Wang, A., Yue, B., Lin, T., & Ding, M.** (2024). Microalgae treatment of food processing wastewater for simultaneous biomass resource recycling and water reuse. *Journal of Environmental Management*, 369, 122394.
- Yao, Y., Gao, B., Chen, J., & Yang, L.** (2013). Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: Mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer. *Environmental science & technology*, 47(15), 8700-8708.
- Yao, Y., Gao, B., Inyang, M., Zimmerman, A. R., Cao, X., Pullammanappallil, P., & Yang, L.** (2011). Removal of phosphate from aqueous solution by biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings. *Journal of hazardous materials*, 190(1-3), 501-507.
- Yeşiltaş, H. K., & Yılmaz, T.** (2019). Sulu Çözeltilerden Fosfor Gideriminde Demir ile Kaplanmış Aktif Karbonun Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 139-146.
- Zahed, M. A., Salehi, S., Tabari, Y., Farraji, H., Ataei-Kachooei, S., Zinatizadeh, A. A., ... Mahjouri, M.** (2022). Phosphorus removal and recovery: State of the science and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 58561-58589.
- Zeybek, Ş.** (2019). *Ceviz kabuğundan aktif karbon eldesi ve adsorpsiyon yöntemi ile fosfor giderimi* (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, YÖK Ulusal Tez Merkezi. (Yayın No. 592705).
- Zhang, H., Chen, C., Gray, E. M., Boyd, S. E., Yang, H., & Zhang, D.** (2016). Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: A phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. *Geoderma*, 276, 1-6.
- Zhang, J., Shen, Z., Shan, W., Mei, Z., & Wang, W.** (2011). Adsorption behavior of phosphate on lanthanum (III)-coordinated diamino-functionalized 3D hybrid mesoporous silicates material. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 76-83.

Zhang, Q., Ding, Y. M., Lu, L., Li, J. X., Liang, M. N., & Zhu, Y. N. (2021). Phosphate Adsorption onto Bagasse Iron Oxide Biochar: Parameter Optimization, Kinetic Analysis, and Study of Mechanisms. *Bioresources*, 16(1).

Zhang, S., Zhang, L., Meng, Q., Wang, C., Ma, J., Li, H., & Ma, K. (2024). Evaluating agricultural non-point source pollution with high-resolution remote sensing technology and SWAT model: A case study in Ningxia Yellow River Irrigation District, China. *Ecological Indicators*, 166, 112578.

Zhang, Y., Jiang, Y., Wang, S., Wang, Z., Liu, Y., Hu, Z., & Zhan, X. (2021). Environmental sustainability assessment of pig manure mono-and co-digestion and dynamic land application of the digestate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110476.

Zhou, L., Xu, D., Li, Y., Pan, Q., Wang, J., Xue, L., & Howard, A. (2019). Phosphorus and nitrogen adsorption capacities of biochars derived from feedstocks at different pyrolysis temperatures. *Water*, 11(8), 1559.

Zou, L., Liu, Y., Wang, Y., & Hu, X. (2020). Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978–2017. *Journal of environmental management*, 263, 110400.